



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝVOJ PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO ZPRACOVÁNÍ
HLINÍKOVÉ SLITINY ALSI7 TECHNOLOGIÍ SELECTIVE
LASER MELTING**

DEVELOPMENT OF PROCESS PARAMETERS FOR SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY FOR
PROCESSING OF ALUMINUM ALLOY ALSI7

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Zvoníček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: Bc. Josef Zvoníček
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj procesních parametrů pro zpracování hliníkové slitiny AlSi7 technologií Selective Laser Melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Technologie Selective Laser Melting patří mezi nejrozšířenější, avšak i pro tuto technologii je v současné době ověřeno jen přibližně 25 materiálů. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další průmyslově zpracovávané komponenty.

Typ práce: výzkumná

Projekt: MPO

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny AlSi7 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Díličí cíle diplomové práce:

- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout rozsahy ověřovaných parametrů,
- experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií,
- porovnat dosažené materiálové vlastnosti s dostupnými materiály,
- ověřit stanovené parametry na komplexním testovacím dílu.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

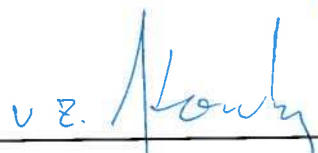
YADROITSEV, I. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.

RAO, Heng, Stephanie GIET, Kun YANG, Xinhua WU a Chris H.J. DAVIES, The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting, Materials & Design, Volume 109, 5 November 2016, Pages 334-346, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.009>.

RAO, Jeremy H., Yong ZHANG, Xiya FANG, Yu CHEN, Xinhua WU a Chris H.J. DAVIES. The origins for tensile properties of selective laser melted aluminium alloy A357, Additive Manufacturing, Volume 17, October 2017, Pages 113-122, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.007>.

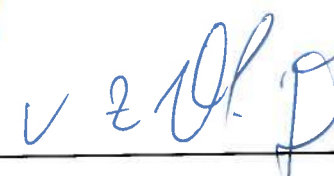
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 19. 10. 2017



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu





doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu procesních parametrů na zpracování hliníkové slitiny AlSi7Mg0,6 pomocí aditivní technologie Selective Laser Melting. Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti. V práci je pojednáno o současném stavu poznání zpracování hliníkových slitin metodou SLM. Vlastní materiálový výzkum práce spočívá v postupných experimentech od návarového testu až po objemový test s následným ověřením mechanických vlastností materiálu. Hodnotícími prvky materiálu v celé práci jsou porozita materiálu, stabilita jednotlivých návarů, tvrdost materiálu a jeho mechanické vlastnosti. Výsledky jsou porovnány s odbornou literaturou.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Selective Laser Melting (SLM), procesní parametry, metalurgický prášek, silumin, mechanické vlastnosti, tepelné zpracování

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the study of the influence of process parameters of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy processing using the additive technology Selective Laser Melting. The main objective is to clarify the influence of the individual process parameters on the resulting porosity of the material and its mechanical properties. The thesis deals with the current state of aluminum alloy processing in this way. The actual material research of the work is carried out in successive experiments from the welding test to the volume test with subsequent verification of the mechanical properties of the material. Material evaluation in the whole work is material porosity, stability of individual welds, hardness of the material and its mechanical properties. The results are compared with the literature.

KEYWORDS:

Selective Laser Melting (SLM), process parameters, metallurgical powder, silumin, mechanical properties, heat treatment

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele doc.Ing. Daniela Koutného Ph.D.

V Brně dne 17. 5. 2018

.....
Josef Zvoníček

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZVONÍČEK, J. Vývoj procesních parametrů pro zpracování hliníkové slitiny AlSi7 technologií Selective Laser Melting. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2018. 101 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc.Ing. Danielu Koutnému Ph.D za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu řešení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a celé rodině za neustálou podporu ve studiu. Poděkování patří mé snoubence a všem blízkým, co na mě při řešení této práce mysleli.

OBSAH

1	Úvod	15
2	Přehled současného stavu poznání	16
2.1	Aditivní technologie	16
2.2	Selective laser melting	16
2.3	Vliv procesních parametrů	19
2.4	Charakteristické jevy a parametry SLM procesu	20
2.5	Hliníkové slitiny zpracované metodou SLM	25
3	Analýza problému a cíl práce	40
3.1	Analýza problému	40
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	40
3.3	Cíl práce	41
4	Materiál a metody	42
4.1	Použitý materiál	42
4.2	Použitá zařízení	42
4.3	Experiment	45
5	Výsledky	49
5.1	Mechanické vlastnosti referenčního materiálu	49
5.2	Analýza prášku	49
5.3	Návarový test	51
5.4	Tenkostěnný test	55
5.5	Objemový test I	59
5.6	Objemový test II	67
5.7	Testování mechanických vlastností	74
5.8	Výroba prototypu	76
6	Diskuze	77
7	Závěr	81
	Seznam použitých zdrojů	83
	Seznam zkratk a použitých veličin	88
	Seznam příloh	93

1 ÚVOD

Aditivní technologie v současné době zaznamenávají významný růst. Jejich použití stále více nacházíme nejen v oblasti výroby prototypů, ale také v konkrétních průmyslových aplikacích. Technologie selective laser melting (SLM) je progresivní aditivní výrobní metodou, která je založena na postupném stavění dílu vrstvou po vrstvě pomocí laserového paprsku. Touto nekonvenční metodou je možné vyrobit součásti složitých tvarů a vnitřních struktur s rozměrovou přesností srovnatelnou při použití konvenčních výrobních metod. Odlehčené díly s optimalizovanou vnitřní strukturou najdeme v letectví a kosmonautice. Tvarově složité díly jako vstříkolisné formy nebo zubní náhrady také najdeme v širokém portfoliu součástí vyrobených technologií SLM. Nevýhodou, které omezuje tuto technologii v širší aplikaci, je zejména vysoká cena, která je spojena s dlouhou dobou stavění dílu. Z tohoto důvodu se technologie SLM nepoužívá k sériové výrobě.

Al-Si slitiny se vyznačují vysokou odolností proti opotřebení, malou tepelnou roztažností a vysokým poměrem mezi pevností a hmotností dílu [1]. Kvůli těmto výše zmíněným vlastnostem a rovnoměrné distribuci filmu povrchové oxidace je eutektická slitina Al-Si vhodná k výrobě technologií SLM [2]. Avšak obecnými problémy při zpracování hliníkových slitin technologií SLM jsou vysoká odrazivost a citlivost na tvorbu oxidačního filmu [3]. Slitiny Al-Si mají své hlavní využití pro výrobu bloků motoru a pístů v automobilním a leteckém průmyslu. Zkoumaná slitina AlSi7Mg0,6 se konkrétně používá pro vysoce namáhané součásti v leteckém průmyslu, jako jsou např. vysokorychlostní turbodmychadla [40].

Hliníkové slitiny Al-Si (siluminy) jsou hojně testované technologií SLM, avšak slitinu AlSi7Mg0,6, kterou se zabývá tato práce, zatím nikdo stejným způsobem v dostupných pracích nezkoumal. Cílem práce je najít vhodné procesní parametry pro stavbu dílů z materiálu AlSi7Mg0,6. Provést mechanické zkoušky vzorků a určit materiálové vlastnosti s návrhem postprocessingu na jejich zlepšení a přispět tak k rozšíření portfolia materiálů používaných k výrobě dílů metodou SLM.

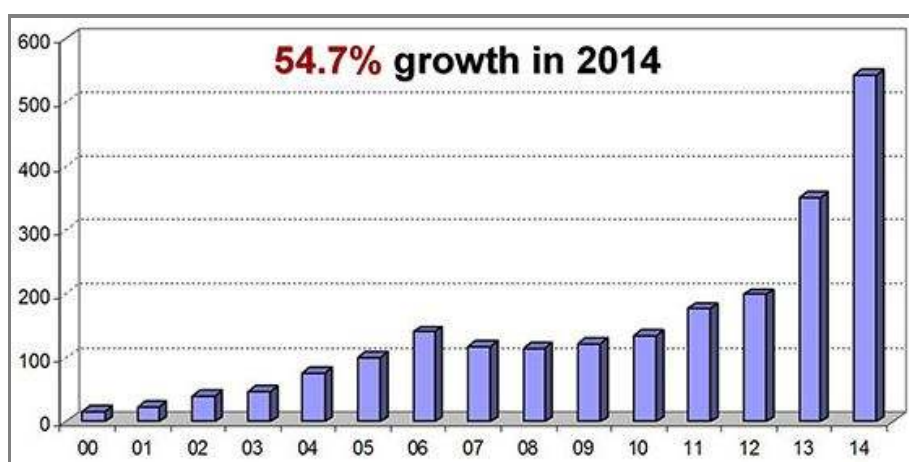


Obr. 1.1 Vrtule pro závodní loď vyrobené z hliníkové slitiny technologií SLM [4]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Aditivní technologie

První aditivní technologie, s názvem stereolitografie, funguje na procesu tuhnutí tenké vrstvy ultrafialového (UV) světelně citlivého kapalného polymeru pomocí laseru [5]. V dnešní době existuje mnoho různých metod výroby součástí na bázi aditivní technologie. Jejich společným znakem je postupné stavění součástí vrstvu po vrstvě. Tímto způsobem je možné vyrobit součásti složitých tvarů s různou vnitřní strukturou, která redukuje hmotnost součástí při zachování jejich mechanických vlastností. Tento způsob výroby dává této technologii potenciál překonávající konvenční technologii výroby.



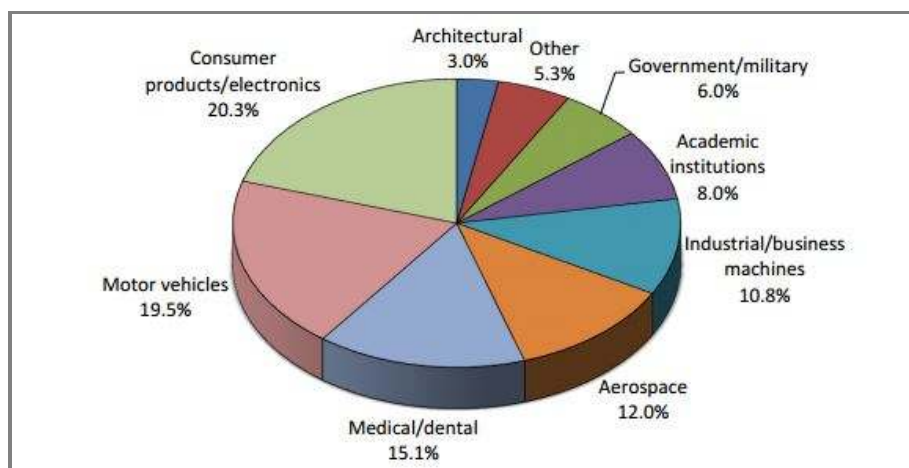
Obr. 2.1 Graf popisující počet prodaných systémů zpracovávající kovové materiály aditivní technologií. Svislá osa označuje počet prodaných systémů a horizontální konkrétní rok [6]

Jak lze vidět z grafu 2.1, počet prodaných systémů zpracovávající kovové materiály aditivní technologií neustále roste. Její použití už není výhradně jen pro výrobu prototypů, ale roste využití pro výrobu finálních výrobků [7]. Graf 2.2 ukazuje podíl využití aditivní výroby v různých odvětvích průmyslu.

Tato diplomová práce se zabývá aditivní technologií selective laser melting (dále jen SLM), která zpracovává kovové materiály. Počet materiálů zpracovatelných metodou SLM neustále roste, avšak jsou materiály, u kterých nejsou známy parametry jejich výroby. Tato diplomová práce by měla k tomuto rozvoji přispět.

2.2 Selective laser melting

Technologie SLM byla poprvé použita v roce 1997. Jejím specifikem je použití vysokovýkonového laseru, s kterým je možné vyrábět kovové komponenty z kovového prášku. Před zahájením výroby součástí je nutné připravit podkladová data pro tisk součástí. Ve vhodném softwaru (např. Autofab) se požadovaný 3D model, nejčastěji ve formátu STL, nařeže na jednotlivé vrstvy, které jsou následně postupně nanášeny a taveny laserovým paprskem. Proces výroby začíná nanesením první vrstvy

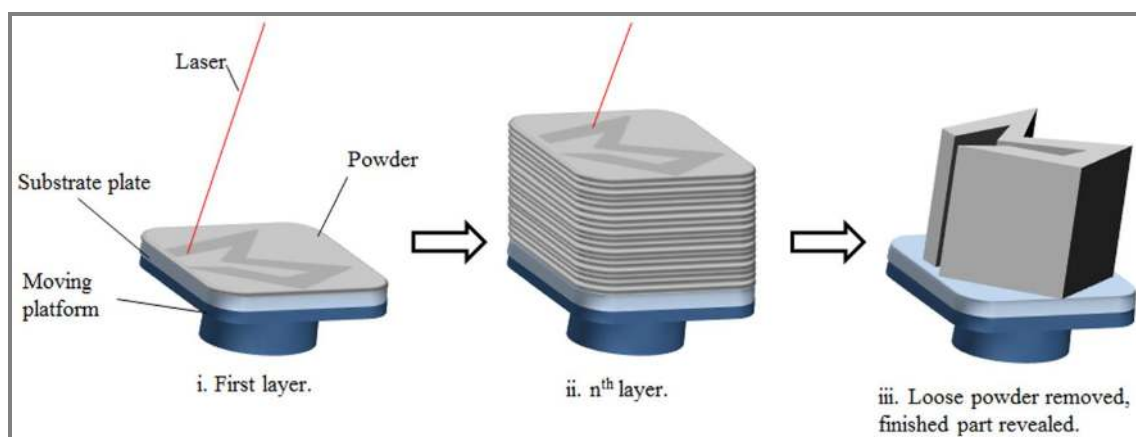


Obr. 2.2 Graf zobrazující užívání SLM technologie v různých odvětvích [8]

prášku pomocí nanašeče prášku. Po roztavení daných míst laserem se stavěcí platforma posune o výšku vrstvy dolů. Následně se nanese nová vrstva prášku a proces se opakuje až do chvíle, kdy je postavena celá součást. Po skončení stavby součásti se přebytečný prášek ze stavěcí komory odstraní a součást je manuálně odstaněna ze stavěcí podložky, nejčastěji pomocí elektroerozivního drátového řezání.

Stavěcí komora je vyplněna inertním plynem z důvodu zabránění vzniku oxidační vrstvy při tavení prášku. Nejčastěji se používá argon nebo dusík. Některé SLM zařízení umožňují vyhřívat stavěcí podložku a celou komoru. Díky tomu je možné snížit zbytkové napětí ve stavěné součásti. Výška vrstvy je obvykle od 20 do 100 μm a je určena požadavkem dobrého rozlišení a tekutosti prášku [9]. Prášek s vyšší velikostí částic způsobuje špatné rozlišení a rozměrovou toleranci, kdežto prášek s malou velikostí částic má sklon k seskupování k sobě kvůli van der Waalsovým silám. To způsobuje špatnou tekutost prášku a následně i jeho nanášení [29].

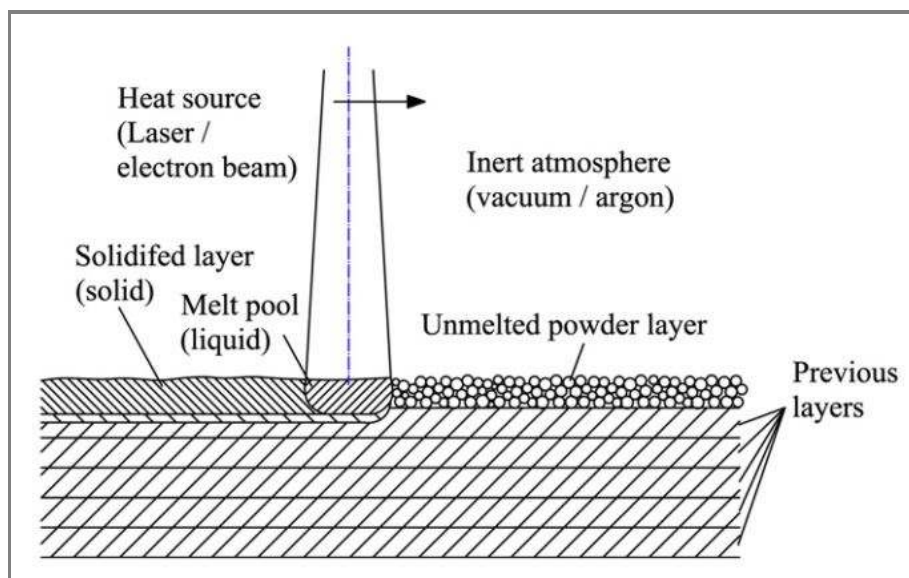
Technologie SLM se od podobných aditivních technologií, jako SLS, která vyrábí kovové materiály, liší plným roztavením kovového prášku produkující součásti s plnou hustotou bez nutnosti dalších postprocesních úprav.



Obr. 2.3 Průběh výroby součásti SLM technologií [29]

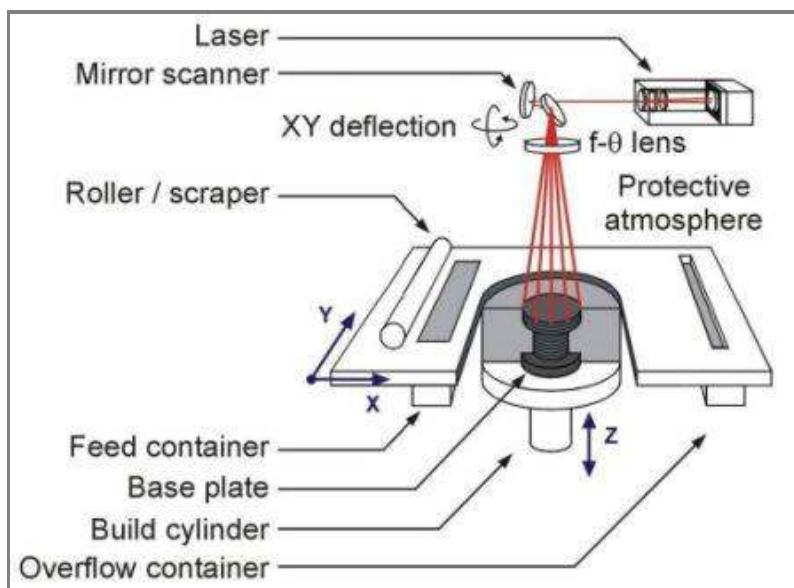
2.2.1 Princip procesu SLM

Princip procesu výroby součástí pomocí SLM je znázorněn na obr. 2.4. Nanesená tenká vrstva kovového prášku je tavena pomocí laseru. Jak je patrné z obrázku, je nutné, aby došlo k dobrému spojení jednotlivých vrstev dostatečným roztavením prášku a předchozí vrstvy. Je důležité, aby stejné spojení vzniklo nejen mezi vrstvami, ale i mezi sousedními návary.



Obr. 2.4 Princip procesu SLM [11]

Na obrázku 2.5 je vidět princip funkce zařízení SLM. Vysokovýkonný laser je zaměřován pomocí natáčecích zrcadel. Po dokončení tavení vrstvy sjede stavěcí platforma o výšku vrstvy dolů. Pomocí nanašeče prášku je nanášena nová vrstva prášku a zároveň odstraněn přebytečný prášek z předchozí vrstvy.



Obr. 2.5 Princip funkce stroje SLM s popisem jednotlivých částí [12]

2.2.2 Procesní parametry SLM

Procesní parametry významně ovlivňují vlastnosti vzniklé součásti. Nejzákladnějšími procesními parametry jsou výkon laseru, rychlost skenování laseru, tloušťka vrstvy a vzdálenost šrafů, která udává kolmou vzdálenost mezi jednotlivými skenovanými stopami. Tyto parametry spolu určují množství energie vnesené do procesu na jednotku objemu. Vedlejšími procesními parametry, které mají většinou konstantní hodnotu, jsou rozměr paprsku laseru, vlnová délka laseru, skenovací strategie, vlastnosti prášku a teplota platformy. Průměr paprsku určuje šířku návaru, která je díky vedení tepla mezi částicemi větší než jeho průměr. Vlnová délka laseru ovlivňuje reflektivitu kovového prášku. S rostoucí vlnovou délkou se reflektivita zvětšuje a schopnost absorpce klesá [13]. Skenovací strategie vytváří dráhy laseru, kterými bude výsledná součást postavena. Vlastnosti prášku ovlivňují proces svou distribucí částic, kompozicí, morfologií, průměrnou velikostí zrn a tepelnou vodivostí prášku. Teplota stavěcí platformy pomáhá snižovat teplotní gradient, ovlivňuje spojení první vrstvy se substrátem a snižuje zbytkové napětí ve stavěné součásti. V tabulce 2.6 jsou zobrazeny všechny procesní parametry ovlivňující stavěcí proces.

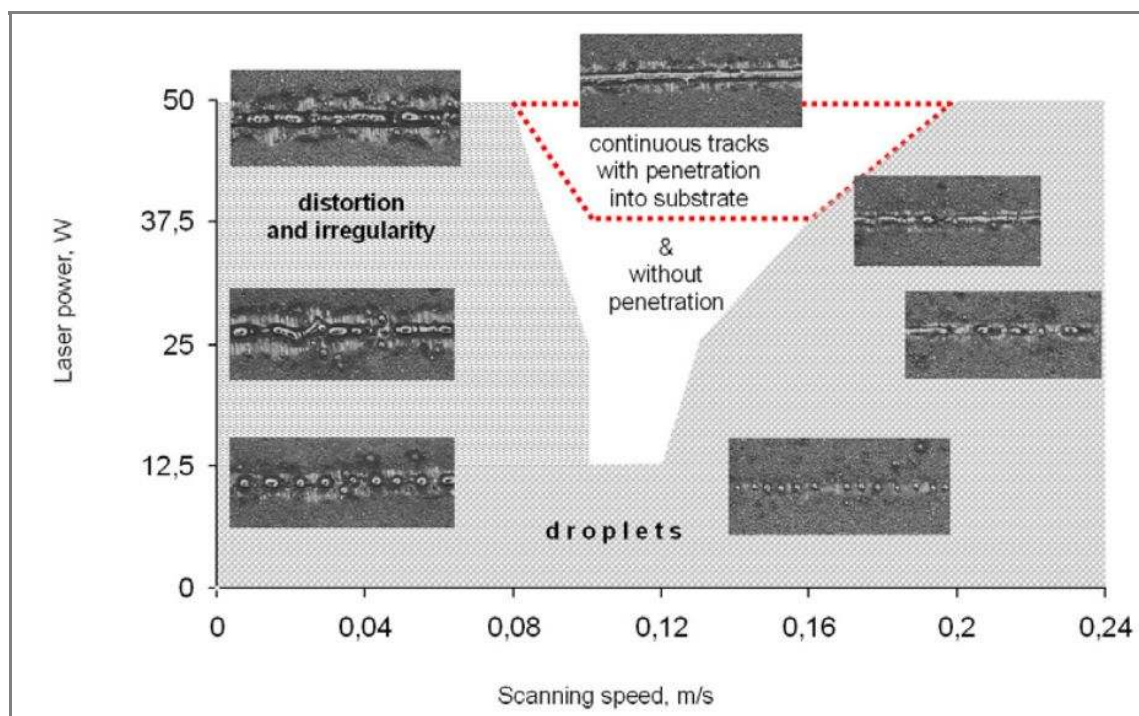
Laser	Skenování	Prášek	Prostředí
Výkon	Rychlost skenování	Distribuce částic	Podíl kyslíku
Průměr paprsku	Hatch distance	Kompozice	Teplota platformy
Vlnová délka	Tloušťka vrstvy	Morfologie	Tlak v komoře
Frekvence pulzů	Skenovací strategie	Průměrná velikost zrn	Typ inertního plynu
Trvání pulzů	Vzdálenost pulzů	Tekutost	Teplota v komoře
Distribuce intenzity	Orientace dílu	Reflektance	
Tepelná vodivost			

Obr. 2.6 Tabulka rozdělení procesních parametrů [32]

2.3 Vliv procesních parametrů

Nevhodné nastavení parametrů může způsobit špatnou tvorbu jednotlivých návarů a jejich spojení s již vytvořenými vrstvami. Snahou je nastavit procesní parametry tak, aby vznikl spojitý návar bez přítomnosti trhlin a porozity. Vznik nepravidelností, balling efektu nebo zdeformování návaru je nežádoucí. Yadroitsev a Smurnov [15] zkoumali vznik jednotlivých návarů v závislosti na měnících se procesních parametrech pro ocelové slitiny 904L a 316L. Na základě série testů byli schopni určit procesní okno pro zkoumaný materiál, při kterém se bude tvořit spojitý návar s dobrou návazností na předchozí vrstvy. Jak jde vidět na obrázku 2.6, v závislosti

na výkonu laseru a rychlosti skenování se tvoří různý tvar návaru. S rostoucí rychlostí skenování klesá tloušťka návaru a hloubka spojení s předchozí vrstvou. Pokud je energie vstupující do procesu dostatečná k vzniku varu roztavené lázně, vznikající výpary způsobují deformaci a nespojitosti návaru. S klesajícím výkonem laseru při konstantní rychlosti skenování dojde při určité mezní hodnotě vstupující energie k vzniku balling efektu a tvorbě nespojitého návaru z kuliček.



Obr. 2.7 Graf závislosti tvorby návaru na hodnotách výkonu laseru a jeho rychlosti [15]

Procesní parametry potřebné k dosažení spojitého návaru s dobrou návazností na předchozí vrstvy ovlivňují z velké části fyzikální vlastnosti a tvar vnějšího povrchu zrn prášku. V práci [15] byly porovnávány procesní parametry potřebné k získání spojitých návarů u dvou ocelových materiálů. Materiál 316L tvořil spojitý návar při větší skenovací rychlosti než materiál 904L. Při porovnávání fyzikálních vlastností materiálů bylo zjištěno, že materiál 904L má dvojnásobnou hodnotu skupenského tepla tání, a z toho důvodu se spojitý návar tvoří při menší skenovací rychlosti.

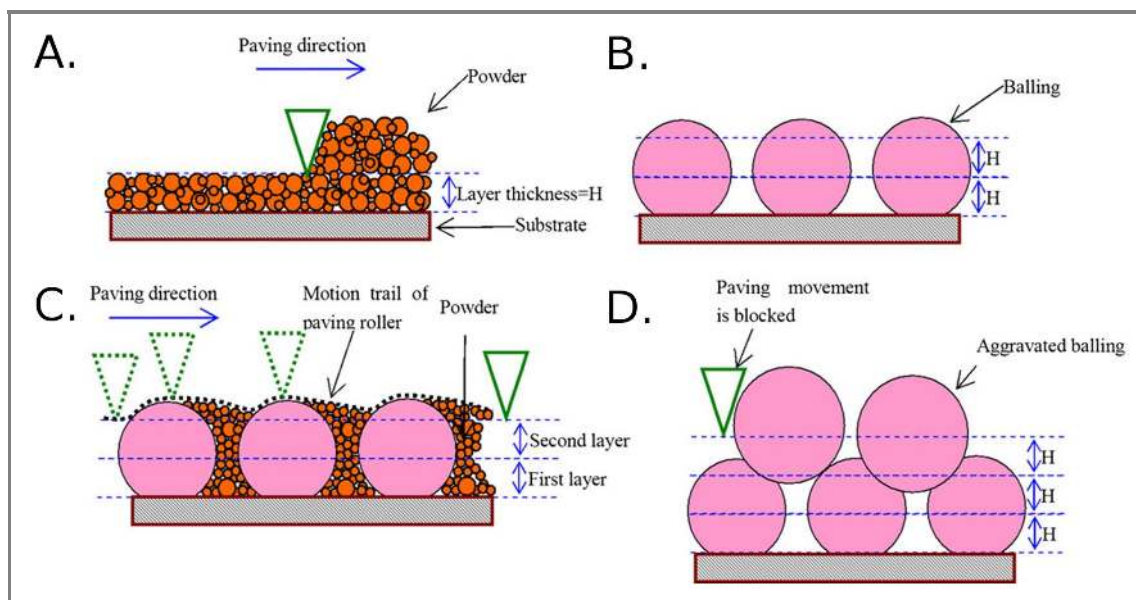
2.4 Charakteristické jevy a parametry SLM procesu

V procesu výroby součástí technologií SLM se potýkáme s jevy, které ovlivňují vlastnosti výsledného dílu.

2.4.1 Balling efekt

Balling efekt je specifický jev v SLM procesu, kdy roztavený kov tvoří kulovité korálky kvůli nedostatečné smáčivosti předchozí vrstvy a povrchovému napětí. Jeho vznik je nežádoucí, protože zabraňuje tvorbě spojitého návaru a vytváří hrubý povrch. V určitých případech může dojít i k zablokování mechanismu nanášejícího

prášek z důvodu vzniku kuliček, které přesahují výšku povrchu stavěné součásti, viz obr.2.8. Louvis [3] zkoumal hliníkovou slitinu 6061 a uvádí, že použití vysokého výkonu laseru a malé skenovací rychlosti vede k vzniku nekontrolovatelně velkého objemu roztavené lázně způsobující balling efekt. Naproti tomu Li [16] zkoumal možnosti eliminace balling efektu pro slitinu 316L a uvádí, že nízký výkon laseru v kombinaci s velkou rychlostí laseru a velkou tloušťkou vrstvy prášku často vede ke vzniku balling efektu. V práci uvádí, že tento jev může být značně potlačen při udržení obsahu kyslíku v komoře pod 0,1 % nebo použitím opakovaného skenování vrstev laserem. Další práce zabývající se zpracováním hliníkových slitin uvádí, že při zvýšení skenovací rychlosti došlo k výraznějšímu vzniku balling efektu z důvodu kapilární nestability roztavené lázně, která vede k rozstříku malých kuliček na povrchu součásti [30,32]. Das [17] vysvětluje, že přítomnost oxidačního filmu brání spojení vrstev vedoucí k vzniku balling efektu.

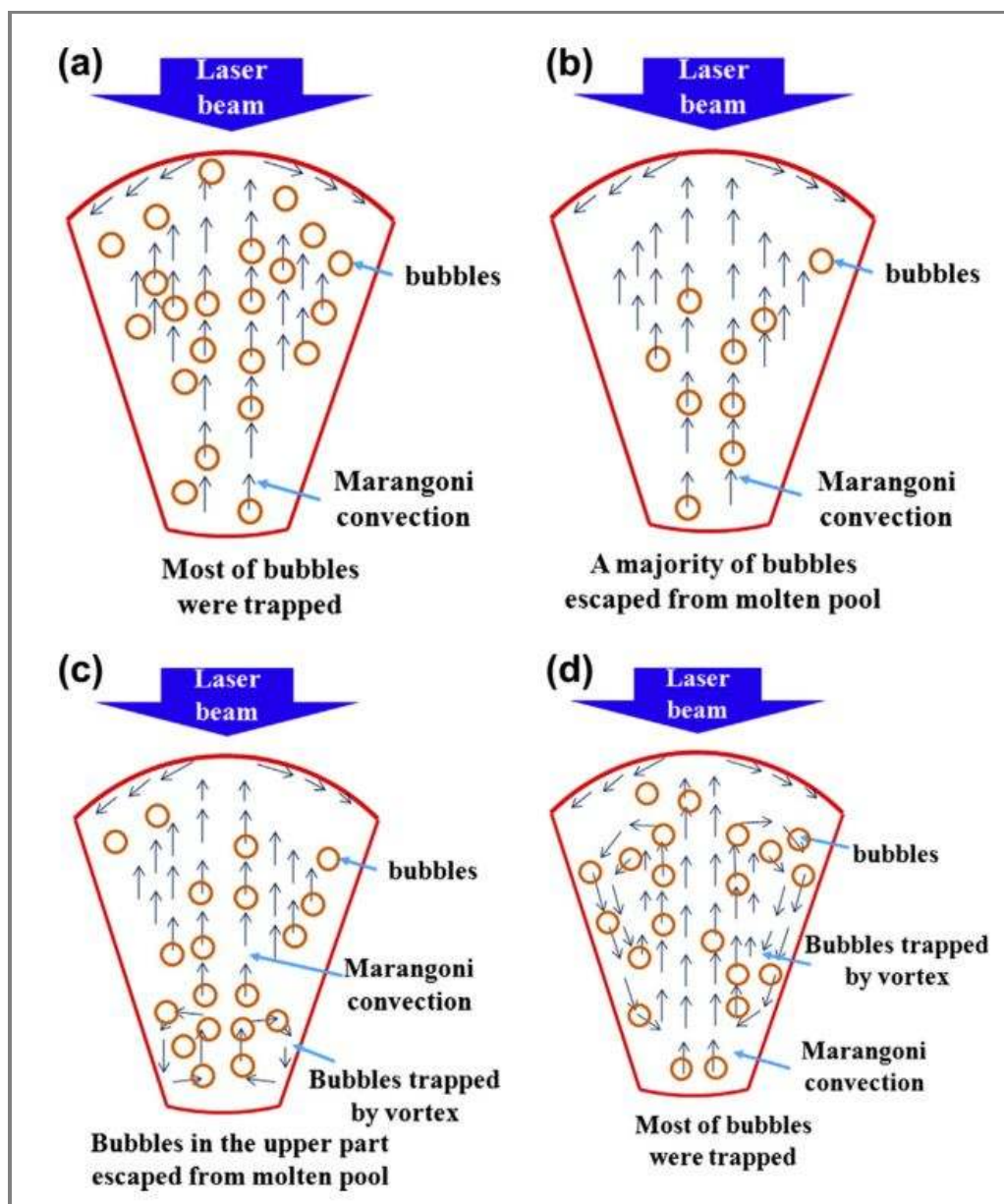


Obr. 2.8 A) Nanášení první vrstvy prášku, B) vznik balling efektu po skenování laserem, C) nanášení druhé vrstvy prášku, D) další vznik balling efektu po skenování laserem a zablokování nanášečského mechanismu [16]

2.4.2 Marangoniho proudění

Marangoniho proudění vznikající v tavenině kovu má vliv na porozitu způsobenou bublinami plynu. Donghua [18] zkoumal vliv vstupující lineární hustoty energie (LED) na chování bublin oxidů v tavicí lázni. Na obrázku 2.9 je znázorněno chování bublin v tavenině v závislosti na hodnotě LED. Obrázek a) ukazuje chování bublin při hodnotě LED $15 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-1}$. Většina bublin je chycena pod povrchem tavicí lázně kvůli jejich malé rychlosti. Obrázek b) pro hodnotu LED $17,5 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-1}$ ukazuje, že díky větší rychlosti jsou bubliny schopny tavnou lázeň opustit. Při zvýšení LED na $20 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-1}$, obr. c), mají bubliny dostatečnou rychlost na opuštění lázně, avšak přítomnost vířivých rotačních proudů má za následek zachycení bublin u spodu tavné lázně. Zvýšením LED až na $22,5 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-1}$ jsou bubliny zachyceny velkými víry a stahovány do středu lázně. To vede k seskupování bublin ve středu lázně a následně

vyšší porozitě. Při této hodnotě LED má tavicí lázeň tendenci se rozstříkovat do okolí za zvýšení výskytu balling efektu.

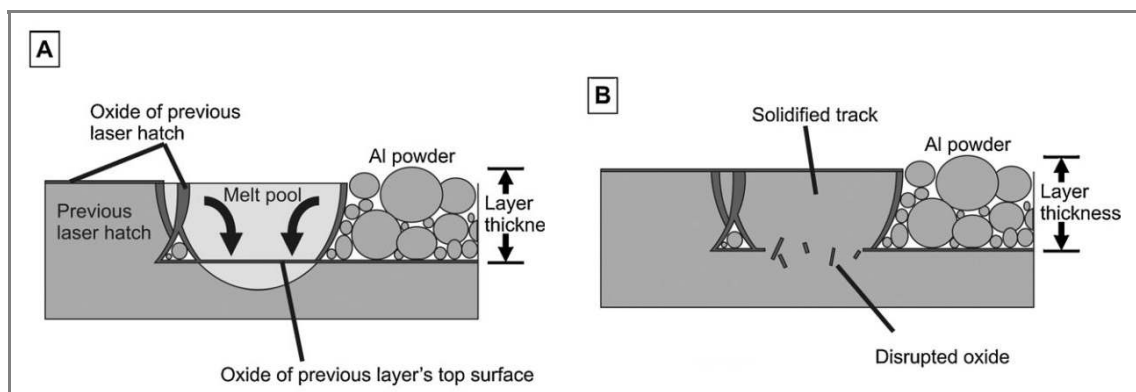


Obr. 2.9 Proudění bublin v tavenině v závislosti na vstupní hodnotě lineární hustoty energie (LED) [18]

2.4.3 Oxidace

Dalším negativním procesem vznikajícím v procesu SLM je oxidace. Vznik oxidační vrstvy při tuhnutí roztavené lázně značně ovlivňuje schopnost spojení jednotlivých vrstev. Jak uvádí Kruth [18], oxidační film snižuje smáčivost povrchů a zamezuje spojení na bázi chemické reakce povrchů čistých kovů. Z toho důvodu vznikají póry s přítomností neroztaveného prášku. Místa s přítomností oxidačního

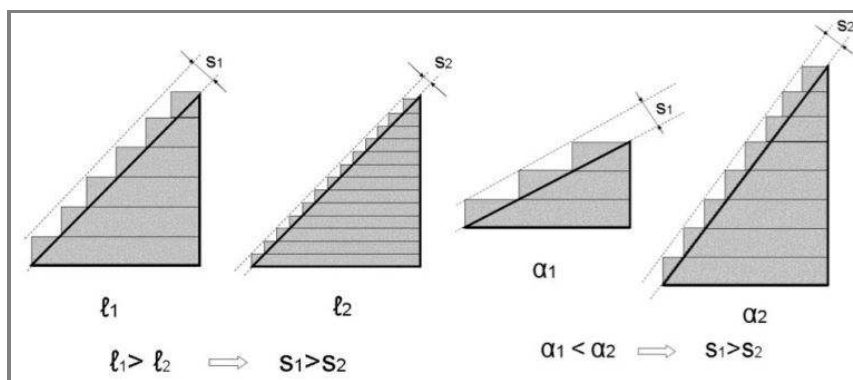
filmu podporují vznik trhlin a lomu součásti [19]. V práci Louvise [3] autoř uvádí, že úplné zamezení vzniku oxidační vrstvy není možné z důvodu neschopnosti zajistit nulový podíl kyslíku v atmosféře pracovní komory. Možnou cestou k zamezení vlivu negativních vlastností oxidační vrstvy je její porušení. Díky vysokému výkonu laseru se má vrchní vrstva oxidačního filmu tendenci vypařit a působením Marangoniho sil uvnitř roztavené lázně dochází k porušení oxidační vrstvy pod lázní, viz obr.2.10.



Obr. 2.10 A - Působení Marangoniho sil v roztavené lázni. B - Porušení oxidačního filmu při tuhnutí lázně [3]

2.4.4 Schodovitý efekt

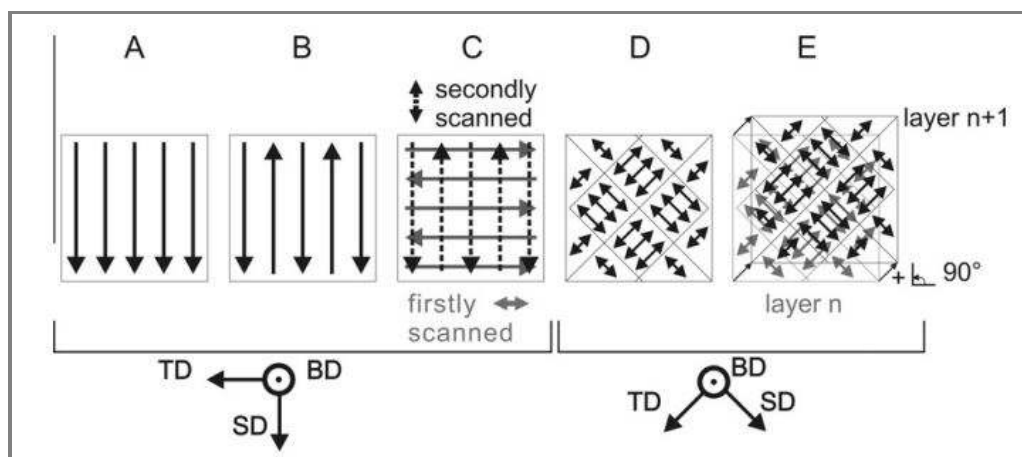
Nepříznivým jevem při stavění dílů je schodovitý efekt, který se projevuje na plochách s úhlem jiným než 0° a 90° . Jak lze vidět na obrázku 2.11, nejvíce ovlivňuje schodovitý efekt tloušťka vrstvy, a jeho negativní vliv roste se snižujícím se úhlem. Potlačit vznik schodovitěho efektu lze přetavením kontur [20].



Obr. 2.11 Schodovitý efekt SLM dílů. l - tloušťka vrstvy, α - úhel povrchu, s - velikost schodu [20]

2.4.5 Skenovací strategie

Skenovací strategie udává dráhu laseru, kterou se má výsledná součást stavět. Tyto strategie jsou určeny výrobcí softwaru k SLM zařízení a nabízí výběr z několika možností. Na obrázku 5.15 jde vidět nejčastěji používané skenovací strategie.

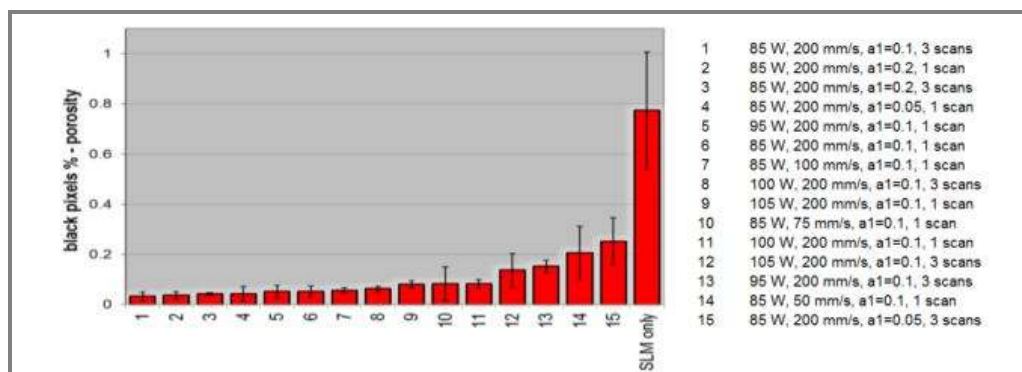


Obr. 2.12 Skenovací strategie: A - jednosměrná, B - obousměrná, C - obousměrná s pootočením o 90° , D - island strategy, E - island strategy s pootočením o 90° a posuvem [21]

Použitá skenovací strategie při výrobě ovlivňuje výsledné vlastnosti součásti. Kruth [22] uvedl, že při skenování menších oblastí dochází k menšímu odvodu tepla ze skenované oblasti, a je tak možné dosáhnout lepší smáčivosti mezi povrchy jednotlivých vrstev a drah, což vede k dosažení větší hustoty. Zkoumal i vliv skenovací strategie na křivost povrchu. Ukázalo se, že při použití island scan strategy je vrchní povrch součásti rovnější než u jednosměrné strategie. Použití vhodné skenovací strategie ovlivňuje také výsledné vnitřní pnutí v součásti [23].

2.4.6 Re-melting

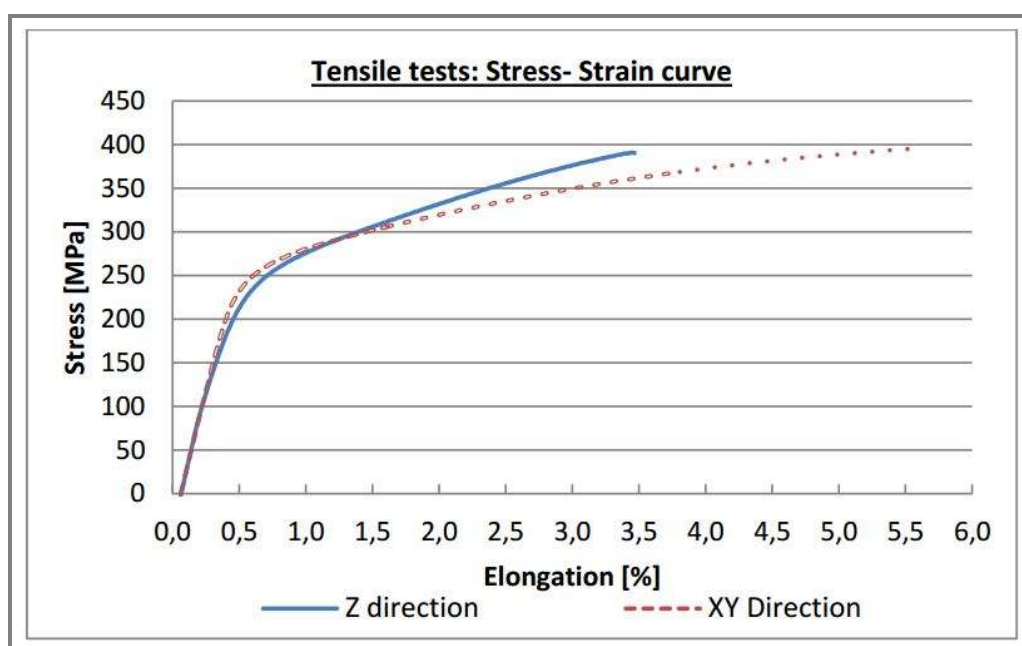
Pomocí re-meltingu je možné dosáhnout u vyráběných součástí snížení porozity a zlepšení drsnosti povrchu součástí. Jde o opakované skenování již roztavené vrstvy prášku laserem. Selective laser re-melting (SLR) je vhodné použít u součástí, kde nebylo dosaženo uspokojivé porozity a u součástí, kde je požadována dobrá kombinace pevnosti a vysoké tažnosti [20]. Z obrázku 2.13, který zobrazuje vliv SLR na hodnotu porozity součásti z materiálu 316L, je patrné, že použitím re-meltingu hodnota porozity může klesnout z 0,77 % až na 0,032 %.



Obr. 2.13 Vliv SLR na výslednou porozitu součásti při různých hodnotách procesních parametrů [20]

2.4.7 Mechanické vlastnosti SLM dílů

Výsledné mechanické vlastnosti dílů vyrobených technologií SLM závisí na mnoha parametrech. Nejlepších mechanických vlastností dosahují vzorky s co nejmenší hodnotou porozity. Různý směr stavby tahových vzorků pro slitinu AlSi10Mg ukázal, že směr stavby nehraje významnou roli [24]. Na obrázku 2.14 je tahový diagram s porovnáním pevnosti horizontálně a vertikálně stavěného tahového vzorku. Avšak v práci Tradowsky [19] autoři uvádí, že ve vertikálně stavěném tahovém vzorku vznikají nepříznivě orientované trhliny, které snižují výslednou pevnost. Tato skutečnost se projeví především v dílech s vyšší procentuální porozitou.



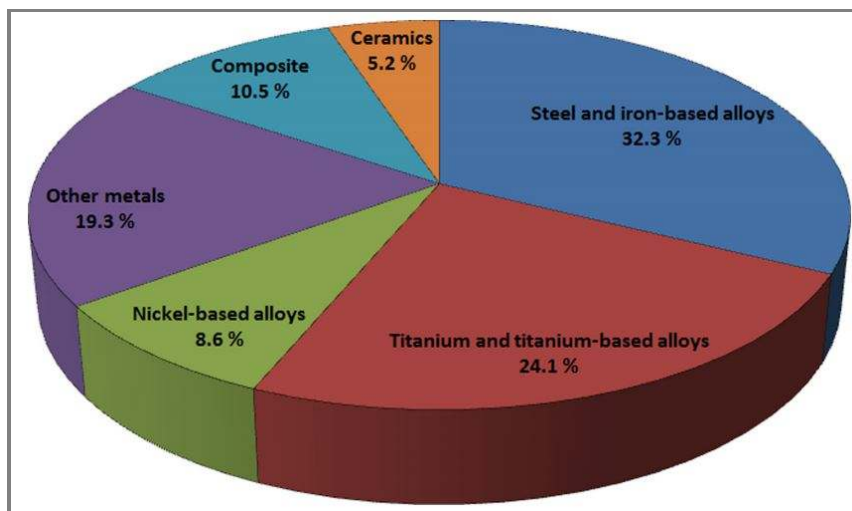
Obr. 2.14 Vliv orientace stavby tahových vzorků materiálu AlSi10Mg [24]

Mez únavy při cyklickém zatěžování u vzorků vyrobených SLM je závislá na množství a druhu vzniklých pórů [25]. Metalurgické póry, které mají kulovitý tvar a jsou vytvořeny zachycením plynu v tavenině jsou méně nebezpečné než keyhole póry, které mají tvar mnohostěnu a vznikají špatným nastavením procesních parametrů.

Výrobní technologií SLM je možné vyrobit součásti z materiálů s velmi jemnou strukturou. To je zejména důvod, proč součásti z SLM mají lepší mechanické vlastnosti než součásti vyrobené konvenčním odléváním [26,27,28].

2.5 Hliníkové slitiny zpracované metodou SLM

Hliníkové slitiny patří mezi hojně studovaný materiál v rámci zpracování technologií SLM. Jak ale ukazuje obr.2.15, jejich zastoupení v porovnání s ocelovými a titanovými slitinami je menšinové. Spolu s materiály na bázi mědi, magnézia a kobalt-chromu jsou zastoupeny v části ostatní kovové materiály zpracované pomocí SLM. Nejčastěji zkoumanou hliníkovou slitinou je AlSi10Mg.



Obr. 2.15 Graf zobrazující podíl materiálů užívaných v SLM technologii[29]

Obecnými výhodami hliníkových slitin je jejich dobrý poměr pevnosti vůči hmotnosti. Olakanmi [2] uvádí, že pozitivními vlastnostmi eutektické slitiny Al-Si pro zpracování technologií SLM jsou její malá tepelná roztažnost a rovnoměrná distribuce filmu povrchové oxidace. Avšak nevýhodami, kterými se hliníkové slitiny liší od ostatních materiálů zpracovaných metodou SLM, jsou jejich odrazivost, špatná teplotnost prášku a vznik oxidačního filmu pokrývající každou vrstvu. Odrazivost, která dosahuje až 91 %, vyžaduje použití většího výkonu laseru. Z důvodu špatné teplotnosti prášku není hliníkový prášek vhodný pro některé nanášeče prášku. Oxidace v průběhu procesu brání správnému spojení jednotlivých vrstev a ovlivňuje smáčivost sousedních povrchů [3].

2.5.1 Relativní hustota slitin hliníku v SLM

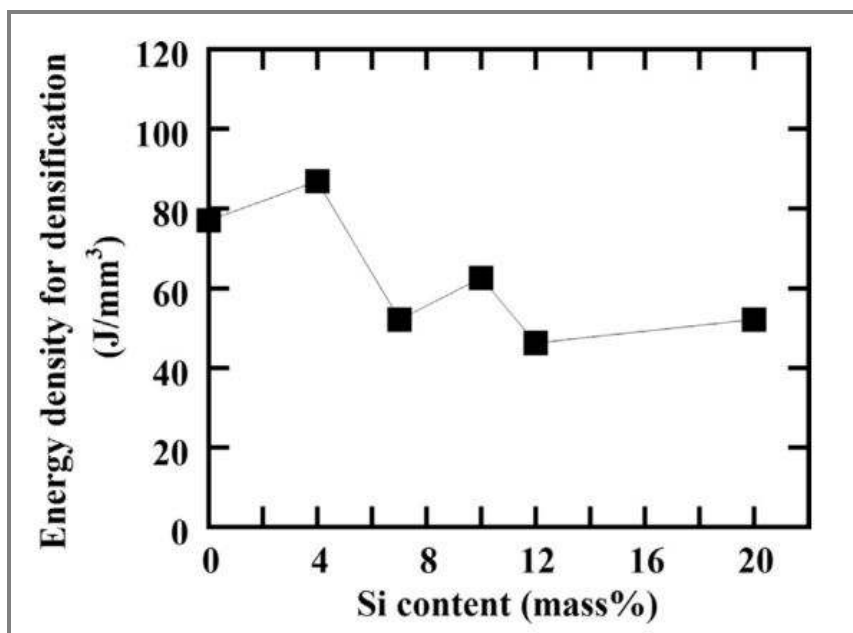
Prvním cílem při zpracování nového materiálu technologií SLM je dosažení co největší relativní hustoty vyráběných dílů. Ta je závislá zvláště na procesních parametrech v průběhu procesu, ale také na vlastnostech metalurgického prášku.

Výkon laseru, skenovací rychlost, vzdálenost šraf a tloušťka vrstvy jsou procesní parametry, které určují hustotu energie vstupující do procesu a tím i výslednou relativní hustotu dílu. Podle vzorce 2.1 jsme schopni vypočítat hustotu energie vstupující do procesu. Kimura [5] ukázal, že relativní hustota vzorků z materiálů AlSi7Mg0,3 může být řízena hustotou vstupní energie.

$$E_d = \frac{P}{v \cdot d \cdot t} \quad (2.1)$$

E_d	J/mm ³	Hustota energie vstupující do procesu
P	W	Výkon laseru
v	mm/s	Skenovací rychlost laseru
d	mm	Vzdálenost šraf
t	mm	Tloušťka vrstvy

Kang [30] zkoumal slitinu AlSi12 a zjistil, že při konstantním výkonu laseru 300 W a různých rychlostech laseru 500, 750 a 1000 mm/s se relativní hustota vzorků téměř nezměnila a zůstala na konstantních 99 %. Lze usoudit, že pro co nejvyšší relativní hustotu vzorků není směrodatná pouze vstupní hustota energie, ale i optimální kombinace procesních parametrů, které ji určují. V tomto případě má hlavní podíl na dosažení nejvyšší relativní hustoty výkon laseru. Kimura [31] ve své další práci zkoumal vliv podílu křemíku v slitině Al-Si na hodnotu hustoty energie vstupující do procesu pro dosažení maximální relativní hustoty materiálu. Pro materiály AlSi0, 4, 7, 10, 12 se mu podařilo dosáhnout téměř 100% relativní hustoty materiálu. Na obrázku 2.16 je zobrazen graf závislosti podílu křemíku ve slitině a hodnotě vstupní hustoty energie. Lze konstatovat, že podíl jednotlivých prvků má významný vliv na energii potřebnou k výrobě dílů s téměř 100% relativní hustotou. Rao [10] zkoumal slitinu AlSi7Mg0,6 (stejná slitina jako v této práci) a vliv jednotlivých procesních parametrů na její relativní hustotu. Podařilo se mu dosáhnout relativní hustoty $99,79\% \pm 0,43\%$ při procesních parametrech výkonu laseru 300 W, rychlosti laseru 2000 mm/s, 0,1 mm vzdálenosti šraf a tloušťce vrstvy 0,03 mm.



Obr. 2.16 Graf závislosti podílu Si na hodnotě vstupní hustoty energie pro dosažení maximální relativní hustoty [31]

Hustota vstupní energie a s ní spojené procesní parametry nemají jako jediné vliv na hodnotu relativní hustoty vyrobeného dílu. Olakanmi [2] uvádí, že na výslednou relativní hustotu dílu má mimo procesních parametrů vliv tvar částic prášku, množství oxidu přítomného v prášku a složení slitiny.

Porozita

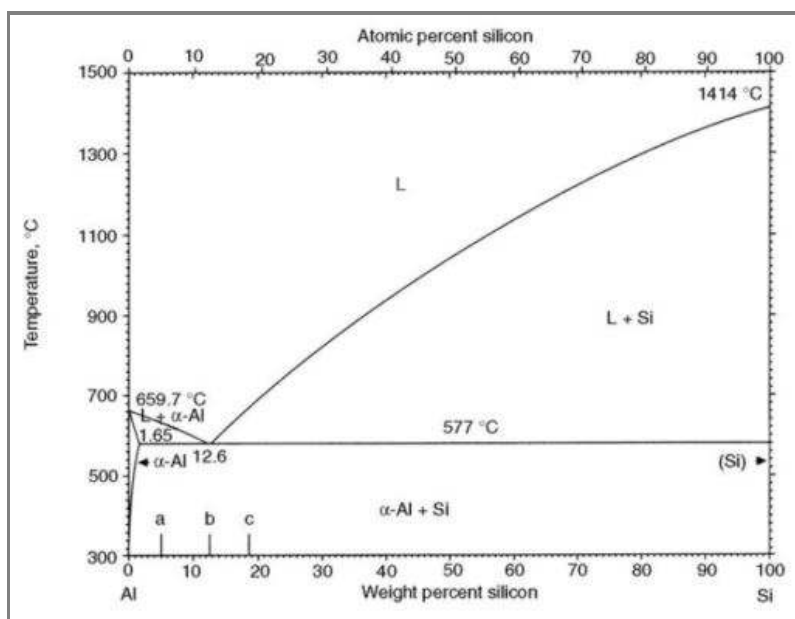
Porozita hliníkových součástí vyrobených SLM je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících hodnotu meze únavy. Jde o inverzní vyjádření hodnoty relativní hustoty materiálu. Snahou je co nejvíce eliminovat vznik pórů a jejich vliv na mechanické

vlastnosti. Porozitu lze rozdělit podle mechanismu vzniku a velikostí pórů do dvou skupin:[32]

- Metalurgické póry - mají sférický tvar s velikostí menší než $100\ \mu\text{m}$. Vznikají při malých skenovacích rychlostech laseru z plynů zachycených v tavicí lázni nebo uvolněných z prášku během tuhnutí. Vysoká hustota vstupní energie vede k rozsáhlému vzniku pórů tohoto typu. Pouze změnou procesních parametrů nelze eliminovat jejich vznik.
- Keyhole póry - mají nepravidelný tvar s velikostí větší než $100\ \mu\text{m}$. Vznikají při vyšších skenovacích rychlostech laseru z důvodu příliš rychlého tuhnutí roztavené lázně. Jejich vznik je závislý na nastavení procesních parametrů.

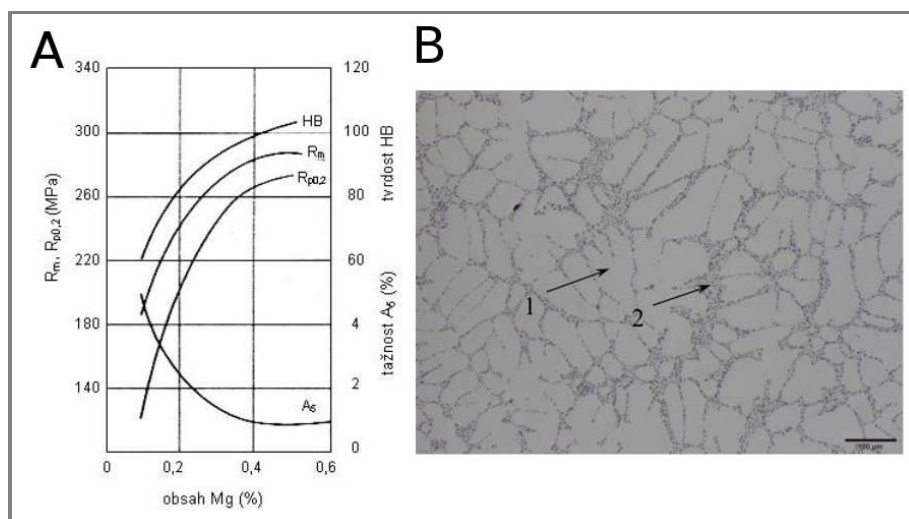
2.5.2 Hliníková slitina AlSi7Mg0.6 v odlévaném stavu

Na obrázku 2.17 lze vidět fázový diagram Al-Si slitin, z kterého vyplývá, že slitina AlSi7Mg0,6 je podeutektická. Jedná se o slitinu, která dobře odolává vzniku trhlin, je ovšem špatně obrobitelná [40].



Obr. 2.17 Fázový diagram Al-Si slitiny [41]

Na obrázku 2.18 A) lze vidět graf závislosti podílu hořčíku na mechanických vlastnostech v tahu, tvrdosti a tažnosti. S rostoucím podílem hořčíku roste pevnost až do maxima obsahu 0,6 %wt. Na obrázku B) je ukázka mikrostruktury po tepelném zpracování T6. U litých slitin je tepelné zpracování obzvlášť důležité, protože vylepšuje mechanické vlastnosti slitiny změnou morfologie a velikosti eutektického křemíku. Šipka 1 ukazuje na dendrity tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ a šipka 2 na eutektikum vyloučené v mezidendritických prostorech.



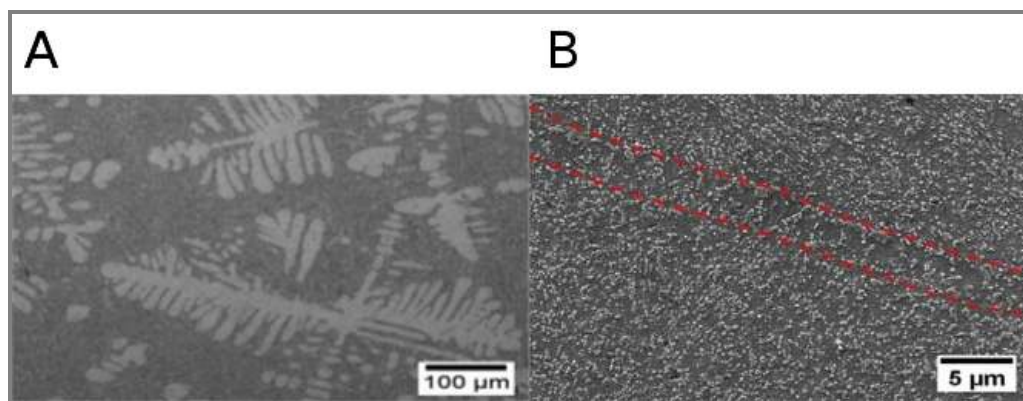
Obr. 2.18 Fázový diagram Al-Si slitiny [40,42]

2.5.3 Mechanické vlastnosti slitin hliníku v SLM

Základními charakteristikami popisující mechanické vlastnosti materiálu jsou:

- Mez pevnosti v tahu
- Mez kluzu v tahu
- Tažnost
- Tvrdost
- Mez únavy
- Lomová houževnatost

Jedním z hlavních hodnotících kritérií děl vyrobených metodou SLM je porovnání jejich mechanických vlastností se vzorky vyrobených konvenčním odléváním. Mechanické vlastnosti z převážné části ovlivňuje mikrostruktura materiálu [26,27]. Hlavním faktorem ovlivňujícím výslednou mikrostrukturu je rychlost ochlazování roztavené lázně. Metodou SLM je dosaženo rychlosti ochlazování více jak $10^5 K/s$ [19], oproti $100 K/s$ [33] při konvenčním odléváním. To vede k rozdílné tvorbě mikrostruktury materiálu, viz obr.2.19.

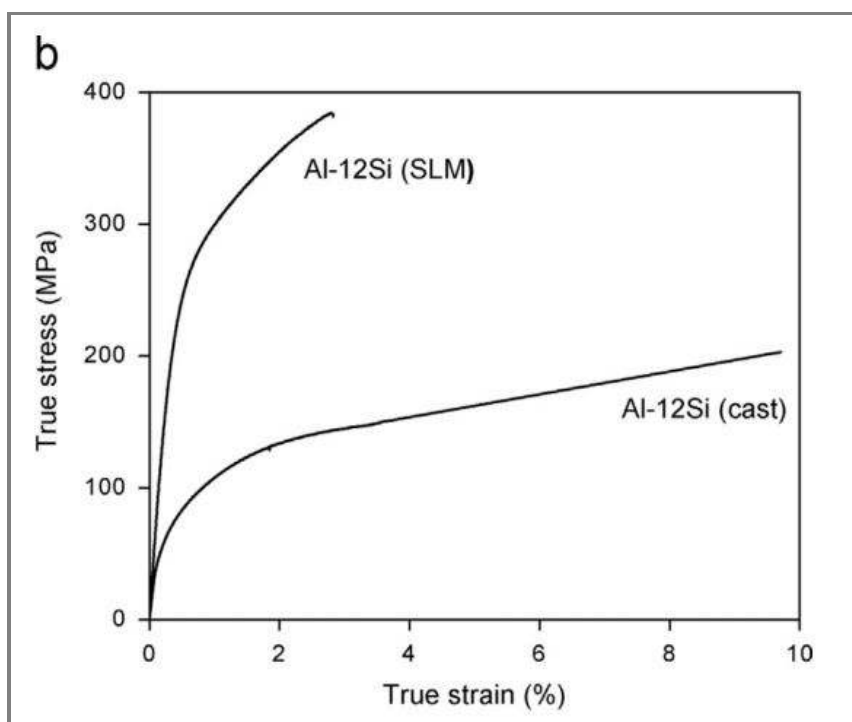


Obr. 2.19 A - struktura konvenčně odlévané slitiny AlSi12, B - struktura AlSi12 vyrobená SLM [34]

Tahové vlastnosti

Kang [30] testoval slitinu AlSi12 vyrobenou smícháním prášku čistého hliníku a čistého křemíku. Chtěl tak porovnat pevnostní charakteristiku této eutektické slitiny při použití prášku vyrobeného mixem čistých prvků a prášku vyrobeného z eutektické slitiny. Dosáhl meze pevnosti v tahu o hodnotě 273 MPa. V porovnání s mezí pevnosti v tahu při použití prášku z eutektické slitiny, která byla 325 MPa, je tato hodnota o 16 % menší. Při porovnání s konvenčně odlévaným materiálem AlSi12, jehož mez pevnosti v tahu je 192 Mpa, je o 42 % větší. Výhodou vzorku z mixovaného prášku oproti vzorku z prášku vyrobeného přímo ze slitiny je větší hodnota poměrného prodloužení, která je 9,5 % oproti 4,4 %.

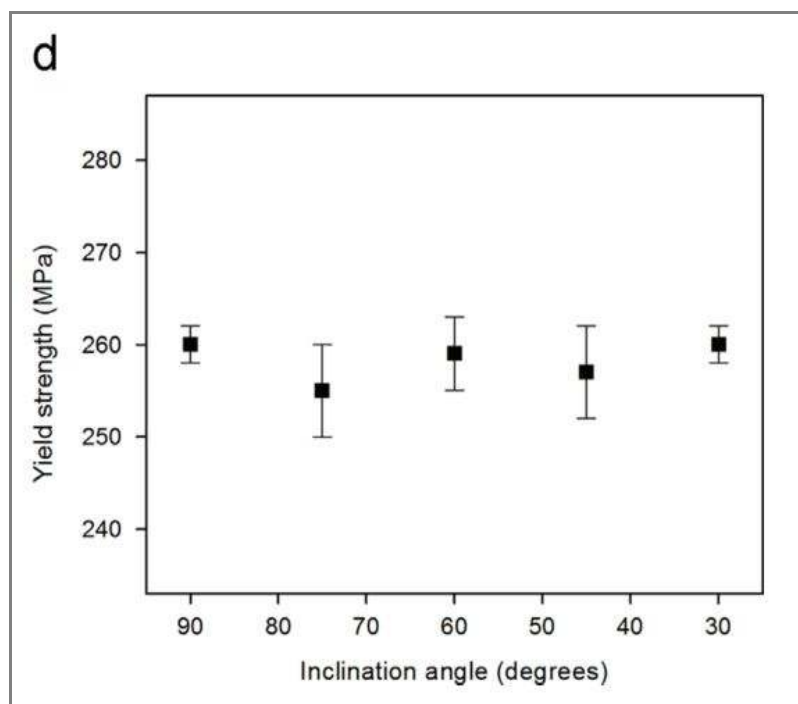
Prashanth [27] testoval mechanické vlastnosti eutektické slitiny AlSi12. Dosažená hodnota meze pevnosti v tahu byla 380 Mpa, což je téměř dvojnásobně více než pro konvenčně odlévaný materiál. Na obr.2.20 lze vidět porovnání mechanických vlastností vzorku z SLM vůči vzorku vyrobeného konvenčním odléváním.



Obr. 2.20 Graf závislosti napětí v tahu na poměrném prodloužení pro slitinu AlSi12 [27]

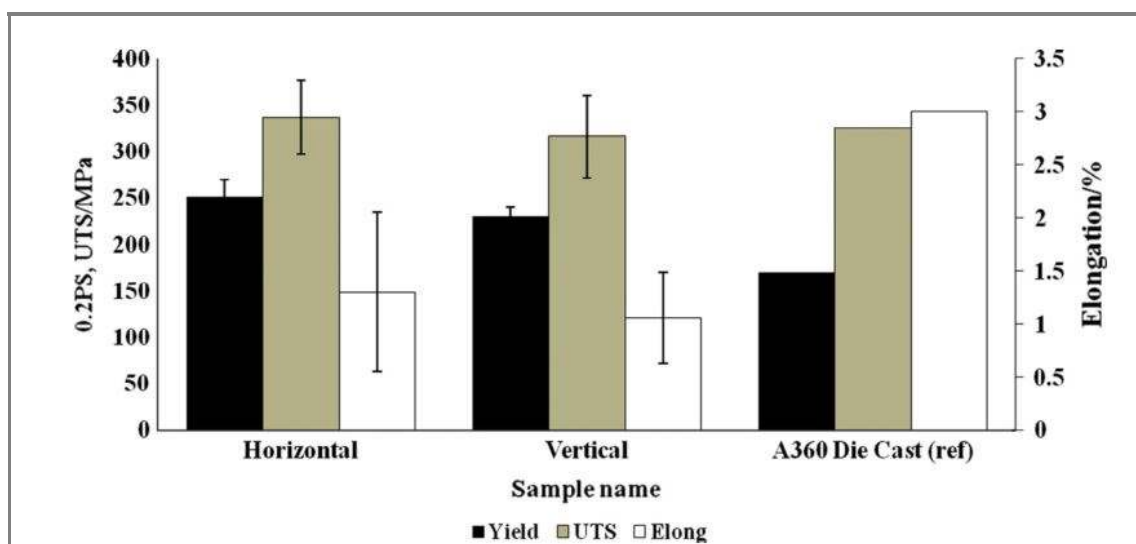
V rámci této práce [27] byl zkoumán vliv úhlu natočení testovaného vzorku vůči stavěcí desce na mechanické vlastnosti vzorku. Graf 2.21 ukazuje, že vliv natočení vzorku nemá význačný vliv na mechanické vlastnosti v tahu.

Toto tvrzení vyvrací práce kolektivu Tradowsky [19]. Jejich práce se od předchozí liší tím, že jejich vzorky dosahovaly mnohem větší porozity oproti práci Prashanth [27]. To jim umožnilo zkoumat vliv porozity pro různé orientace testovaného vzorku vůči stavěcí desce. Zjistili, že horizontálně vyrobené vzorky obsahují příznivěji orientované dutiny než vzorky vyrobené vertikálně. To je vysvětlení, proč vzorky s horizontální orientací dosahovaly hodnoty meze pevnosti v tahu o 35 % lepší než vertikální vzorky.



Obr. 2.21 Graf závislosti hodnoty meze kluzu na úhlu natočení vzorku vůči stavěcí desce [27]

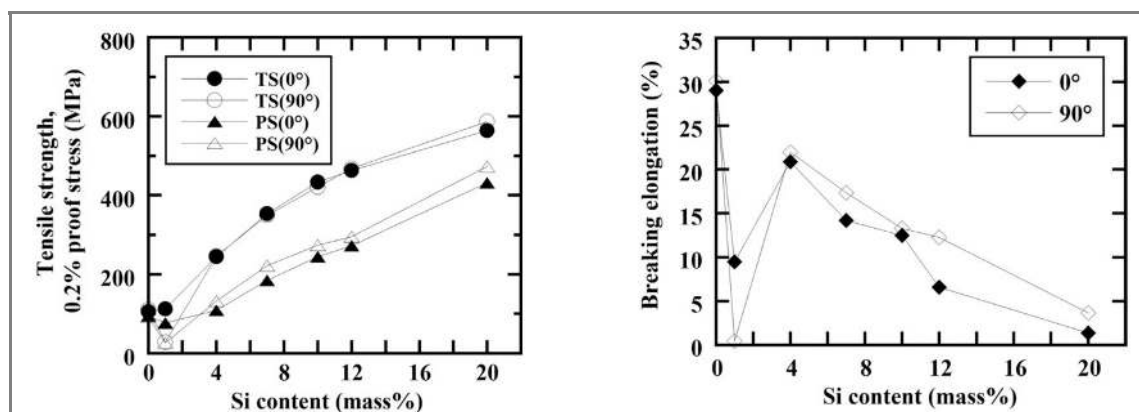
Read [35] zkoumal pevnostní charakteristiky slitiny AlSi10Mg. S použitím optimálních procesních parametrů, kterými dosáhl minimální porozity 0,7 %, naměřil hodnotu meze pevnosti v tahu pro horizontálně orientovaný vzorek 335 MPa. Oproti vzorku vyrobenému konvenčním odléváním metodou "die casting", byla jeho hodnota mez pevnosti v tahu srovnatelná. Na obr.2.22 lze vidět graf jednotlivých vzorků s hodnotami meze pevnosti a meze kluzu v tahu s podélným prodloužením.



Obr. 2.22 Graf zobrazující hodnoty meze pevnosti a meze kluzu v tahu s hodnotami podélného prodloužení [35]

Kimura [31] publikoval práci, v které zkoumal vliv procentuálního množství křemíku v Al-Si slitině na mechanické vlastnosti v tahu. Výsledky jeho práce ukazují,

že s rostoucím procentuálním množstvím křemíku v Al-Si slitině roste mechanická odolnost v tahu, ale naopak klesá jeho tažnost. Tyto výsledky platí pro všechny zkoumané slitiny s výjimkou AlSi1, kde se v mikrostruktuře objevily trhliny, které snížily jeho mechanickou odolnost. Závislost množství křemíku na mechanické vlastnosti je zobrazena na obr.2.23.



Obr. 2.23 Graf porovnávající mechanické vlastnosti vzorků v závislosti na podílu křemíku v Al-Si [31]

V další práci [5] Kimura zkoumal slitinu AlSi7Mg0,3 a publikoval mechanické vlastnosti o hodnotě meze pevnosti 400 MPa, meze kluzu 200 MPa a poměrného prodloužení 13 %. Rao [10] ve své práci zkoumal slitinu AlSi7Mg0,6 a dosáhl meze pevnosti 426 MPa, meze kluzu 280 MPa a poměrného prodloužení 10 %.

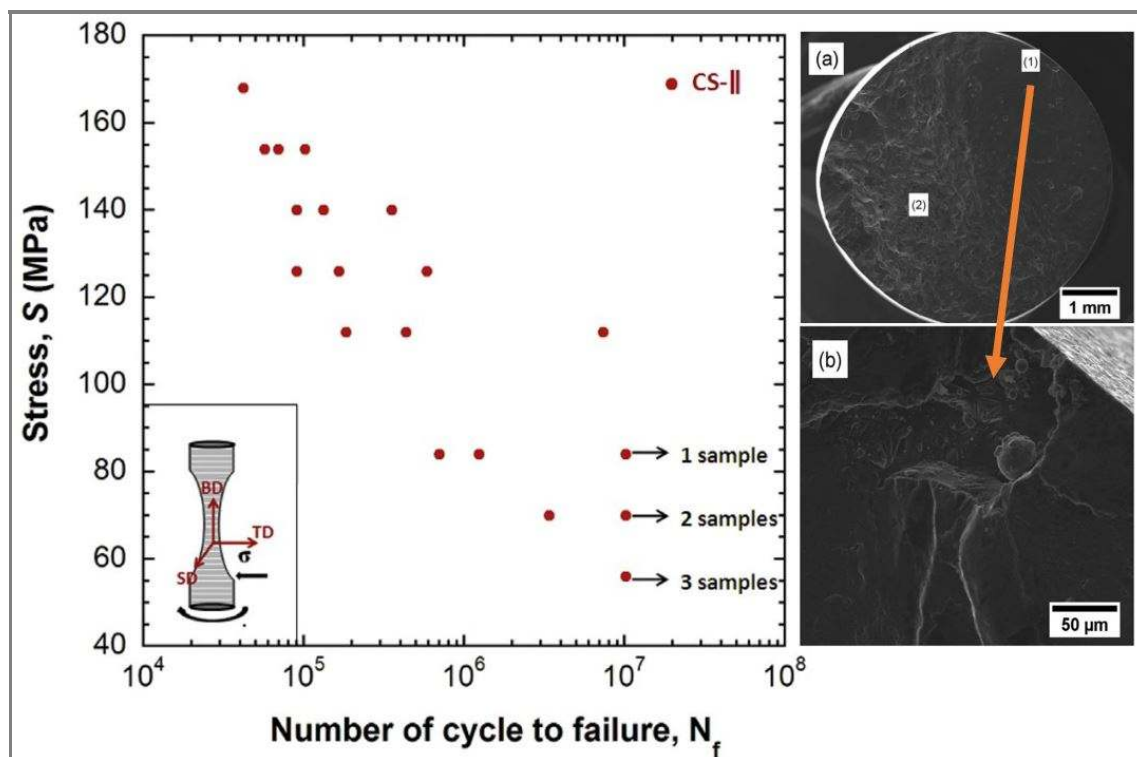
Tvrдост

Tvrдост dílů vyrobených metodou SLM je závislá na více parametrech. Jak uvádí práce Kang [36], tvrдост souvisí s porozitou dílu a jeho mikrostrukturou. Ve své práci zkoumal tvrдост vzorků ze slitiny AlSi18. Tvrдост se vzrůstající relativní hustotou vzorků vzrůstala až do svého maxima 105 HV, po kterém prudce klesla. Zkoumáním mikrostruktury vzorků došel k závěru, že prudký pokles tvrдостi u posledního vzorku byl způsoben transformací nanočástic křemíku do větších zrn. Tato úvaha koresponduje s klasickým efektem homogenní distribuce jemných částic zvyšujících tvrдост slitiny.

Únavové vlastnosti

Suryawanshi [34] zkoumal únavové vlastnosti slitiny AlSi12. Obecným předpokladem je, že mez únavy bude dosahovat od 40 % do 50 % hodnoty meze kluzu. Nejlepšího procentuálního výsledku 50 % dosáhl vzorek vyrobený konvenčním odléváním. Vzorky vyrobené technologií SLM dosáhly meze únavy pouze 22 % z jejich hodnoty meze kluzu. Po tepelném zpracování vzorků žíháním narostla jejich procentuální hodnota meze kluzu na 41 %, viz obr.2.24 vlevo. Při detailním zkoumání lomové plochy tepelně zpracovaného vzorku bylo zřejmé, že iniciace unavového lomu pro vzorky vyrobené metodou SLM byla u povrchu součásti v místě nedostatečně roztaveného prášku, viz obr.2.24 vpravo. Následné šíření lomu vedlo hlavně podél

tras laseru. U konvenčně vyrobených vzorků to bylo místo mikropóru vzniklé sražením roztavené lázně během procesu tuhnutí.



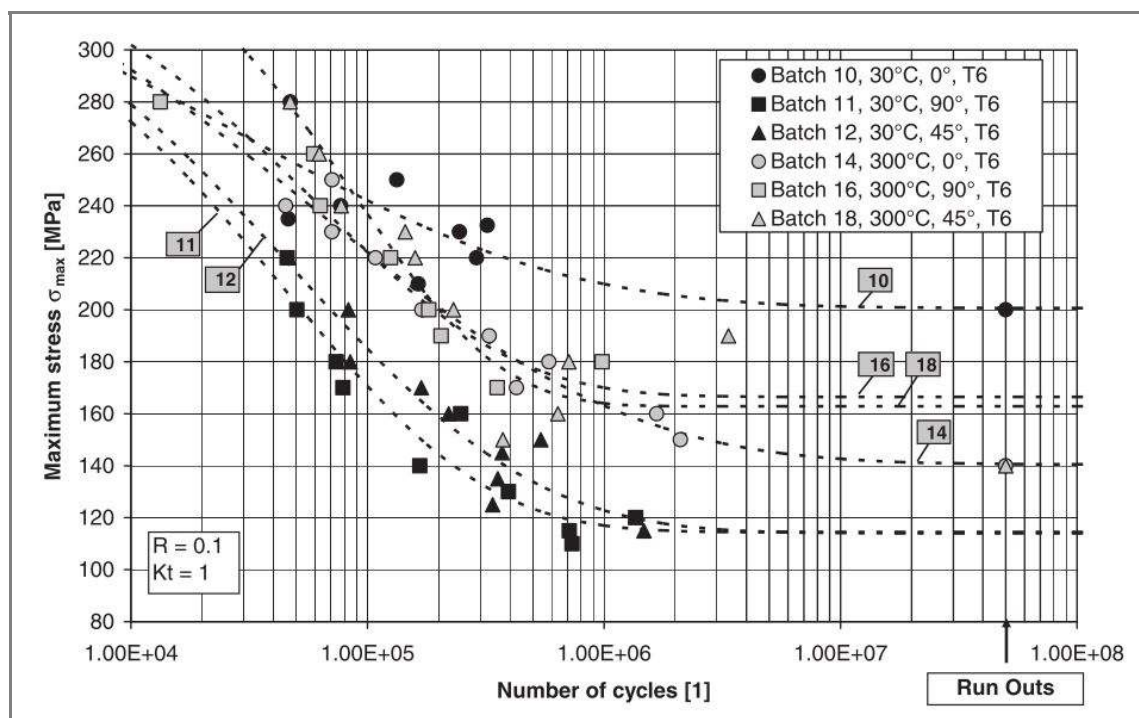
Obr. 2.24 Graf závislosti ohybového napětí na počtu cyklů do lomu (vlevo), detailní pohled na lomovou plochu a místo iniciace trhliny (vpravo) [34]

Další práci zkoumající únavové vlastnosti slitiny AlSi10Mg publikoval Brandl [11]. Mez únavy vyhodnocoval u vzorků s různou orientací vůči stavěcí podložce (0° , 45° , 90°), s různou teplotou stavěcí platformy (30° , 300°) a s rozdílným tepelným zpracováním (bez, T6). U vzorků vyrobených s teplotou platformy 30° a použitým tepelným zpracováním T6 se ukázal velký rozptyl hodnot v závislosti na orientaci vzorků vůči stavěcí platformě. Hodnota meze únavy pro vzorek stavěný rovnoběžně s platformou dosahuje téměř o 50 % lepší hodnoty meze únavy než vzorky stavěné pod úhlem 45° a 90° . Tento rozptyl vymizí při změně teploty stavěcí platformy na 300° , avšak za cenu poklesu maximální dosažené hodnoty meze únavy. Výsledné křivky s hodnotami meze únavy jsou zobrazeny v grafu 2.25.

Mez únavy pro tepelně nezpracované vzorky dosahovala největších hodnot okolo 100 Mpa. Z bližšího zkoumání lomové plochy vyplývá, že iniciační místo lomu se vždy nachází na povrchu součásti nebo v jeho blízkosti. Iniciátorem jsou póry, které vznikly nedostatečným roztavením prášku. U tepelně zpracovaných vzorků je mechanismus lomu houževnatý oproti vzorkům bez tepelné úpravy. Z toho lze vyvodit, že tepelné zpracování má příznivý vliv na únavové vlastnosti materiálu vyrobeného metodou SLM.

Lomová houževnatost

V práci [34] Suryawanshi zkoumal lomovou houževnatost slitiny AlSi12. U vzorků vyrobených konvenčním odléváním bylo dosaženo hodnoty lomové houževnatosti



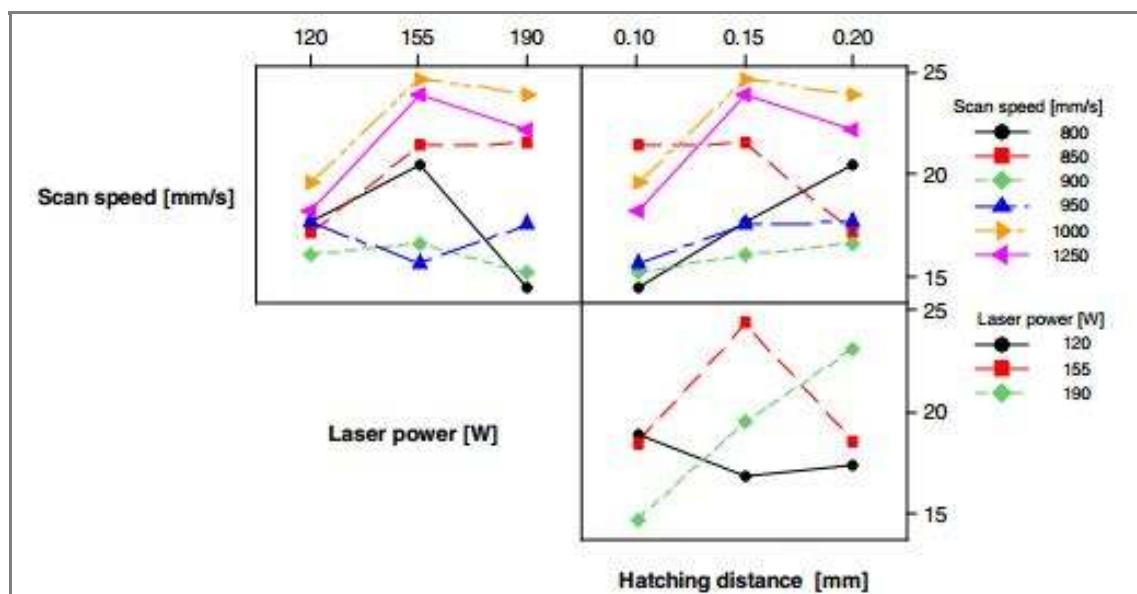
Obr. 2.25 Graf zobrazující průběh hodnot napětí závislých na počtu cyklů do lomu [11]

$11 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$. Vzorky vyrobené metodou SLM pod úhlem 0° dosáhly až čtyřnásobně větších hodnot lomové houževnatosti než u konvenčně odlévaných vzorků. Tepelně zpracovaný vzorek z SLM zaznamenal překvapivě nižší hodnotu houževnatosti. I přes to, byla jeho hodnota lomové houževnatosti téměř 2x větší než u konvenčně odlévaného materiálu. Tento překvapivý výsledek potvrzuje, že tepelné zpracování SLM vzorků snižuje jeho lomovou houževnatost. Suryawanshi [34] navíc udává, že odolnost proti vzniku trhliny je větší u konvenčně odlévaných vzorků. Avšak růst trhliny je po jejím iniciování rychlejší než pro vzorky vyrobených metodou SLM.

Struktura povrchu hliníkových slitin

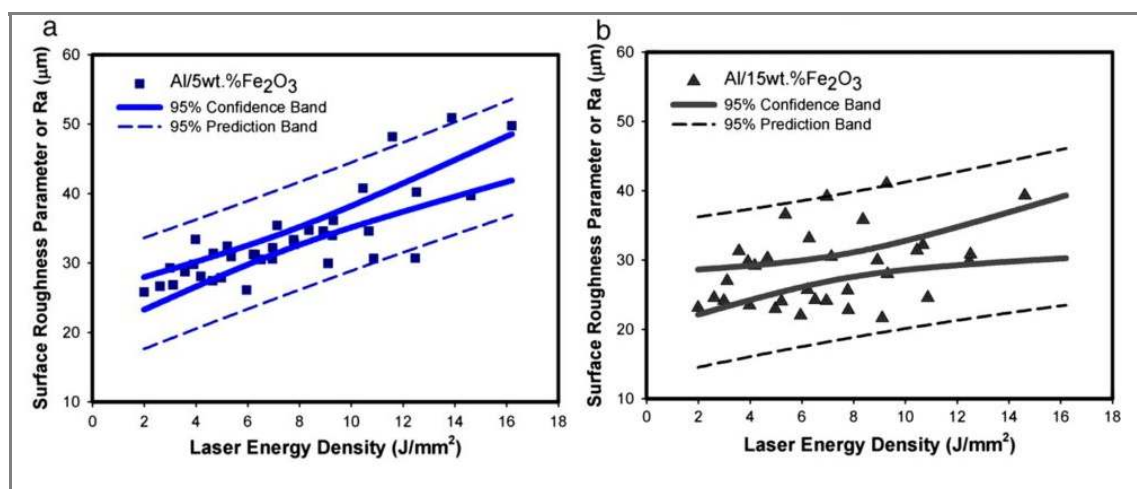
Calignano [37] zkoumal vliv procesních parametrů na drsnost povrchu slitiny AlSi10Mg s pomocí statistické metody. Uvádí, že skenovací rychlost má největší vliv na drsnost povrchu. Grafy na obrázku 2.26 zobrazují různé závislosti procesních parametrů na dosažené drsnosti povrchu. Nejlepší hodnoty pro drsnost povrchu bylo dosaženo při výkonu laseru 120 W, rychlosti skenování 900 mm/s a vzdálenosti šraf 0,1 mm. V práci byl též zkoumán vliv postprocesního kuličkování na zlepšení povrchu. Kuličkování skleněnými kuličkami při tlaku 8 bar zlepšilo drsnost povrchu až o 83 %.

Práci zaměřenou na hodnotu drsnosti povrchu v závislosti na procesních parametrech publikoval Dadbakhsh [38]. Zkoumaným materiálem byl čistý hliník s příměsí Fe_2O_3 v hmotnostním poměru 5, 10 a 15 %. Nejlepší hodnoty drsností, pro všechny materiály, byly okolo $23 \mu\text{m}$. Obecně lze říci, že s rostoucím výkonem laseru při konstantní skenovací rychlosti drsnost povrchu roste. To potvrzuje graf 2.27, který zobrazuje závislost drsnosti povrchu na hustotě vstupní energie. Výsledný povrch



Obr. 2.26 Závislost drsnosti povrchu na použitých procesních parametrech pro materiál AlSi10Mg [37]

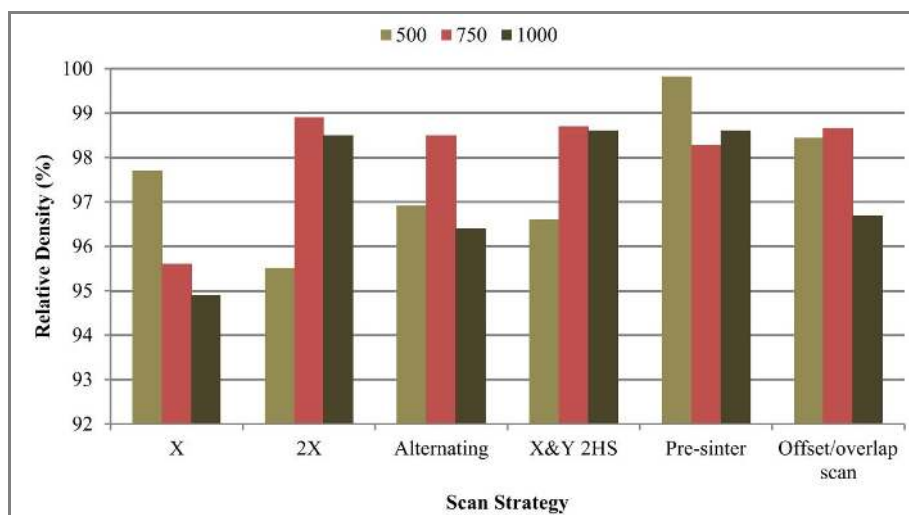
negativně ovlivňuje balling efekt, projevující se rozstříkáním roztaveného kovu, který je způsobený nadměrnou energií vstupující do procesu.



Obr. 2.27 Grafy závislosti hodnoty drsnosti povrchu na vstupní hustotě energie pro materiál čistého hliníku s příměsí Fe₂O₃ [38]

Vliv skenovací strategie na hliníkové slitiny

Vliv skenovací strategie na výslednou relativní hustotu dílu zkoumal Aboulkhair [32]. Nejvyšší relativní hustoty 99,77 % bylo dosaženo skenovací strategií Pre-sinter. To je jednosměrná strategie použitá dvakrát na jedné vrstvě, přičemž poprvé je výkon laseru nastaven na poloviční výkon. Na obrázku 2.28 je zobrazen graf závislosti relativní hustoty energie na použité strategii skenování. Pro každou strategii byly použity tři různé skenovací rychlosti 500, 750 a 1000 mm/s, výkon laseru 100 W, tloušťka vrstvy 40 a vzdálenost šraf 50 μm .



Obr. 2.28 Graf závislosti použité strategie skenování na výsledné relativní hustotě dílu [32]

Thijs [21] použil k výrobě slitiny AlSi10Mg různé skenovací strategie. Nejvyšší hustoty 99,4 % bylo dosaženo s obousměrnou skenovací strategií, kdy každá vrstva byla skenována dvakrát s pootočením o 90°.

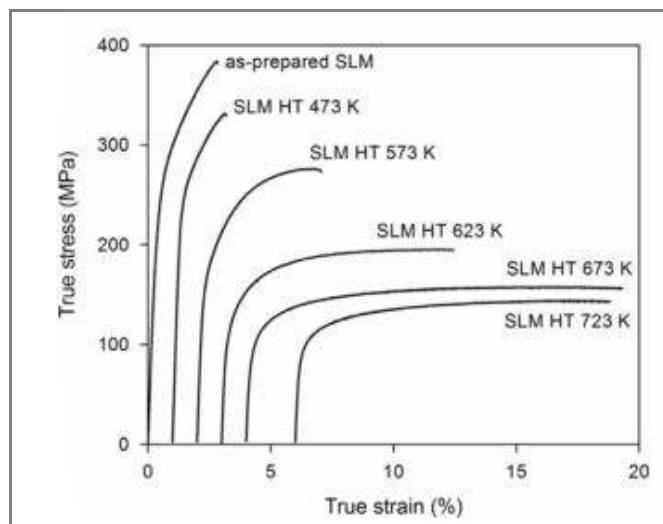
Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelným zpracováním dílů vyrobených technologií SLM se snažíme snížit vnitřní pnutí v součásti, vylepšit jejich mechanické vlastnosti nebo je upravit v závislosti na oblasti použití. Nejběžnějším způsobem tepelného zpracování u konvenčně odlévaných hliníkových slitin je vytvrzování za účelem zvýšení meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti [39].

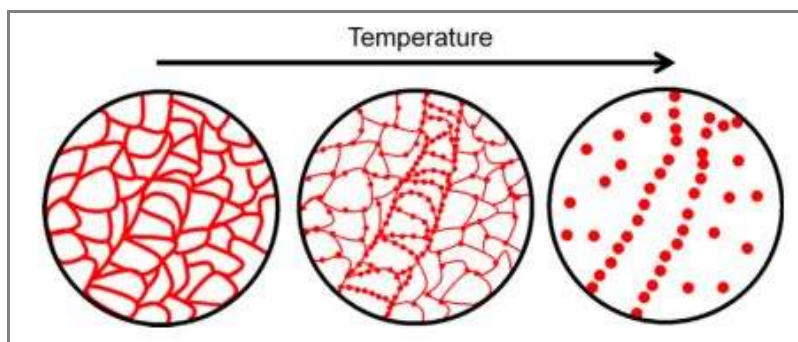
Prashanth [27] ve své práci zkoumal tepelné zpracování slitiny AlSi12. Vyrobené vzorky žíhal při různých teplotách od 200 do 500 °C v argonové atmosféře po dobu 6h. Zjistil, že velikost Al a Si zrn se zvětšila téměř dvojnásobně pro Al a 18x pro Si při teplotě 500 °C. Hmotnostní podíl volného křemíku vzrostl z 1 % na 8 % při stejné teplotě. To naznačuje, že s vzrůstající žíhací teplotou dochází k většímu vylučování křemíku z Al mřížky. Na obrázku 2.29 lze vidět graf závislosti napětí a poměrného prodloužení vzorku pro různé teploty žíhání.

Obrázek 2.30 zobrazuje způsob vylučování a růstu Si zrn. Velikost růstu křemíku je exponenciálně závislá na velikosti žíhací teploty. Při zkoumání lomových ploch je vidět, že lomový mechanismus se mění při vzrůstající teplotě žíhání z křehkého na houževnatý.

Kimura [5] zkoumal vliv tepelného zpracování slitiny AlSi7Mg0.3. Vzorky podrobil tepelnému zpracování T5 (umělé stárnutí při teplotě 150 - 350 °C po dobu 5 hodin) a T6 (rozpouštěcí žíhání při teplotě 535 °C po dobu 8 hodin, následné ochlazení ve vodě a umělé stárnutí při teplotě 155 °C po dobu 6 hodin). Při použití tepelného zpracování T5 dochází s vzrůstající teplotou k nárůstu velikosti Si částic. Grafy 2.31 ukazují, že mez pevnosti a mez kluzu vzorků v tahu s rostoucí žíhací teplotou klesá a jejich hodnota poměrného prodloužení narůstá. Tímto tepelným zpracováním je možné upravit mechanické vlastnosti vzorku podle potřeby jejich funkčnosti.

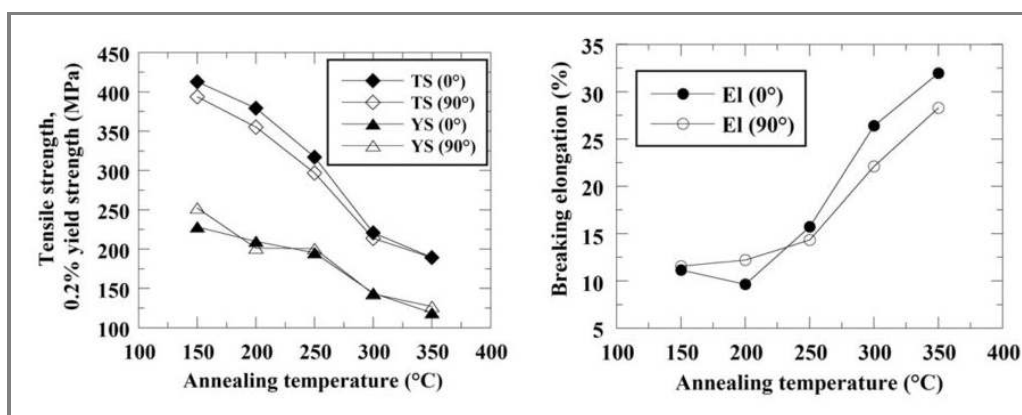


Obr. 2.29 Graf závislosti meze pevnosti v tahu na poměrném prodloužení [27]



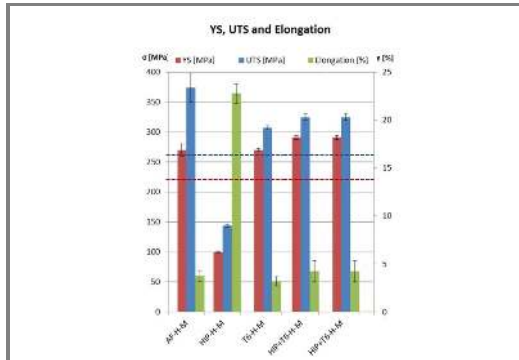
Obr. 2.30 Zobrazení způsobu vylučování Si při vzrůstající teplotě žíhání [27]

Použitím tepelného zpracování T6 bylo dosaženo degradace pevnosti a poměrného prodloužení vzorků z důvodu hrubých Si precipitátů.



Obr. 2.31 Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žíhání pro tepelné zpracování T5 [5]

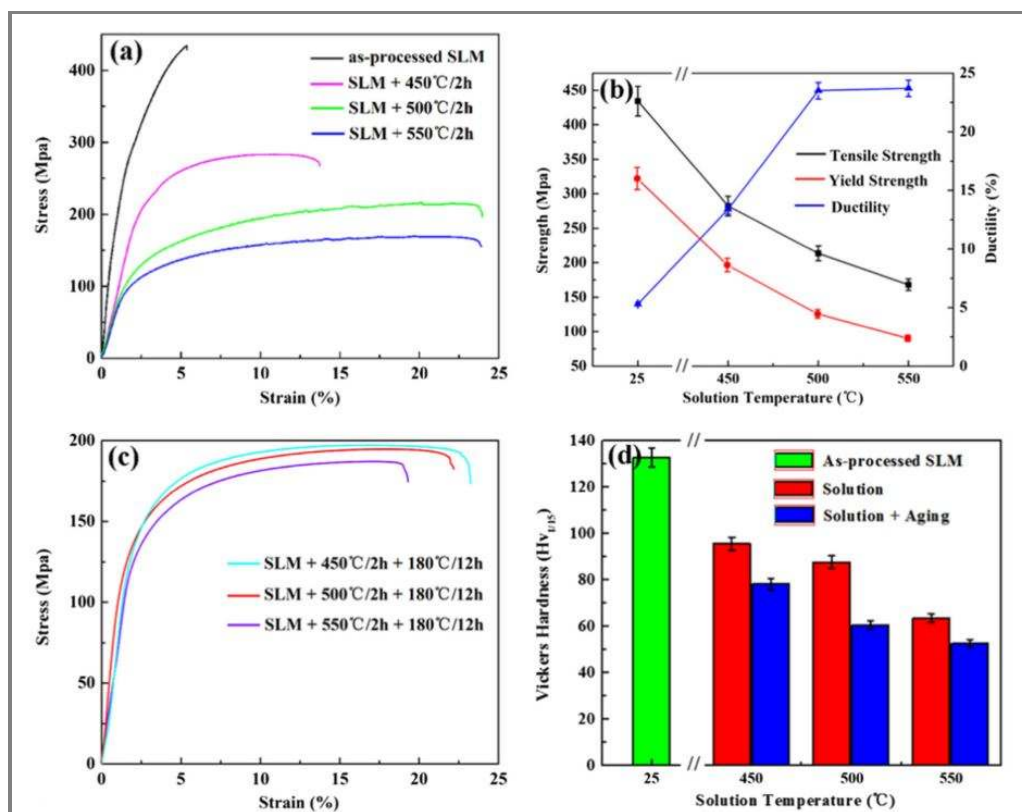
V práci kolektivu Tradowsky [19] byl zkoumán vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti vzorků ze slitiny AlSi10Mg. Bylo použito tepelné zpracování



Obř. 2.32 Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žhání [19], AF - vzorek bez tepelného zpracování, H - horizontální orientace vzorku při stavbě, M - obrobený tahový vzorek

Na obrázku 2.32 lze vidět mechanické vlastnosti vzorků pro různé kombinace tepelného zpracování. Aplikace HIP výrazně snižuje mez pevnosti a mez kluzu vzorku za vzrůstu hodnoty poměrného proloužení. Použitím T6 se zmenšila maximální hodnota meze pevnosti vzorku a jeho poměrné prodloužení oproti postprocesně nezpracovanému vzorku. Kombinací HIP a T6 bylo dosaženo mírného zlepšení meze kluzu. Z lomových ploch bylo vyzorováno, že použitím HIP bylo zredukováno množství pórů vzniklých přítomností oxidační vrstvy. Čárkované čáry zobrazují hodnotu meze pevnosti a kluzu pro konvenčně odlévaný materiál.

Další práci zabývající se tepelným zpracováním slitiny AlSi10Mg publikoval Li [26]. Vzorky tepelně zpracoval podle standardů tepelného zpracování T6. Všechny vzorky byly podrobeny rozpouštěcímu žíhání při různých teplotách 450 °C, 500 °C a 550 °C. Následovalo rychlé ochlazení ve vodě a část vzorků byla podrobena umělému stárnutí při teplotě 180 °C po dobu 12 hodin. Podobně jako u předchozích prací byla pozorována klesající rozpustnost Si v Al matici se zvětšující se žíhací teplotou. Ve vzorcích byl analyzován vznik Mg₂Si jehož podíl se díky separaci Si z Al matice zvětšoval. Mg₂Si je intermatilická fáze, která u odlévaných slitin zvyšuje mechanické vlastnosti. I přes zvýšený podíl této fáze v tepelně zpracovaných vzorcích mechanické vlastnosti vzorků v tahu poklesly oproti vzorkům v nezpracovaném stavu. Grafy 2.33 ukazují mechanické vlastnosti testovaných vzorků. Autoři tvrdí, že vysoká pevnost vzorků vyrobených SLM je přisuzovaná jemné mikrostruktuře. Ta vyniká v pevnosti díky své schopnosti zabránit pohybu dislokacím. Tepelným zpracováním je tato jemná struktura rozbita a proto dochází k poklesu pevnosti a nárůstu tažnosti.



Obr. 2.33 Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žíhání [26]. (a) - Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení žíhaných tahových vzorků, (b) - Závislost tahového napětí a poměrného prodloužení na hodnotě žíhací teploty, (c) - Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení vzorků podrobených umělému stárnutí, (d) - Graf dosažené tvrdosti v závislosti na použitém tepelném zpracování a teplotě žíhání

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Výroba součástí technologií SLM je pro každý materiál specifickou záležitostí. Nastavení procesních parametrů hraje významnou roli v oblasti dosažení minimální porozity a jemnozrné struktury dílu a tím i získání maximálních mechanických vlastností. V této diplomové práci bude dosaženo prozkoumání vlastností slitiny při zpracování technologií SLM a objasnění vlivu jednotlivých procesních parametrů na výslednou porozitu a mechanické vlastnosti. V rámci dílčích cílů budou navrženy experimentální tělesa s metodou testování i vyhodnocením, experimentální popsání vlivu procesních parametrů a strategií a ověření vhodných strategií pro výrobu komplexních testovacích dílů.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z rešeršní části vyplývá, že základním předpokladem pro dobré mechanické vlastnosti materiálu je dosažení co největší relativní hustoty materiálu. Ta je spojena s volbou vhodných procesních parametrů, které eliminují vznik nepříznivých jevů jako je balling nebo oxidace. Sekundárními vlivy, které zasahují do výsledné kvality dílu, jsou pak vlastnosti použitého prášku, složení inertní atmosféry ve stavěcí komoře a vlastnosti laseru, kterým je zařízení vybaveno.

Vady, které snižují mechanickou odolnost v již vyrobeném dílu jsou především metalografické a keyhole póry. Jejich vznik nelze vždy eliminovat pouze vhodným nastavením procesních parametrů, ale záleží i na kvalitě dodaného prášku.

Mechanické vlastnosti hliníkových slitin vyrobených SLM dosahují až dvojnásobně vyšší meze pevnosti v tahu než pro konvenčně odlévaný materiál za cenu snížené tažnosti. Únavové vlastnosti SLM dílů silně závisí na hodnotě porozity. Mez únavy v některých případech dosahuje stejné, až mírně větší hodnoty napětí.

S úpravou mechanických vlastností podle záměru použití souvisí tepelné zpracování. Nejčastěji byl zkoumán vliv žíhání s následným vytvrzováním pomocí umělého stárnutí. Všechny typy tepelného zpracování vedly k snížení meze pevnosti vzorků. Pouhým žíháním bylo vždy dosaženo výrazného zlepšení hodnoty tažnosti. Tepelným zpracováním HIP za zvýšeného tlaku bylo dosaženo redukce porozity ve vyrobených vzorcích.

Z poznatků rešerše konkrétně vyplývá, že použitím výkonu laseru vyšším než 200 W pro hliníkové slitiny (siluminy), lze dosáhnout hodnot relativní hustoty větších než 99 %. Lze očekávat, že nejlepších mechanických vlastností bude dosaženo právě při tomto a vyšším výkonu laseru s ostatními procesními parametry, které budou vytvářet hodnotu hustoty vstupní energie mezi $40 - 100 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$. Důvodem takovýchto procesních parametrů je nutnost překonat různé fenomény, které při zpracování hliníkových slitin vznikají. Jsou jimi především vysoká odrazivost hliníku, velká tepelná vodivost, vznik oxidačního filmu. Pro kompletní prozkoumání

materiálu ale bude nutné prozkoumat i ty kombinace procesních parametrů, které pravděpodobně nepovedou k dobrým vlastnostem materiálu.

Výsledkem této práce bude zjistit takové procesní parametry výroby, aby bylo možné vyrábět díly různých tvarů a objemů pro různé aplikace v průmyslu.

3.3 Cíl práce

Hlavním cílem práce je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny AlSi7Mg0,6 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle práce

- Navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení
- Navrhnout rozsahy ověřovaných parametrů
- Experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií
- Porovnat dosažené materiálové vlastnosti s dostupnými materiály
- Ověřit vhodné strategie výroby na komplexním testovacím dílu

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Použitý materiál

4.1.1 Hliníková slitina AlSi7Mg0,6

Zadáním práce je určeno použití hliníkové slitiny AlSi7Mg0,6. Prášek byl objednán od firmy SLM Solutions v balení 20 kg. Průměrná velikost částic prášku udávaná dodavatelem je 50 μm . Chemické složení slitiny, viz obr.4.1 je dáno normou EN 1706:2010. Slitina je dle ČSN EN 1725 označena jako AlSi7Mg0,6. Lze nalézt i označení dle normy US Aluminum Association, kde je tato slitina vedena pod označením A357 nebo F357 podle obsahu berylia.

Tab. 4.1 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 dle normy EN 1706:2010

Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Mg	Zn	Další	-
max 0,19	6,5 - 7,5	max 0,1	max 0,25	max 0,05	0,45 - 0,7	max 0,07	každé 0,03, dohromady 0,1	Al - zbytek

4.2 Použité zařízení

4.2.1 SLM 280^{HL}

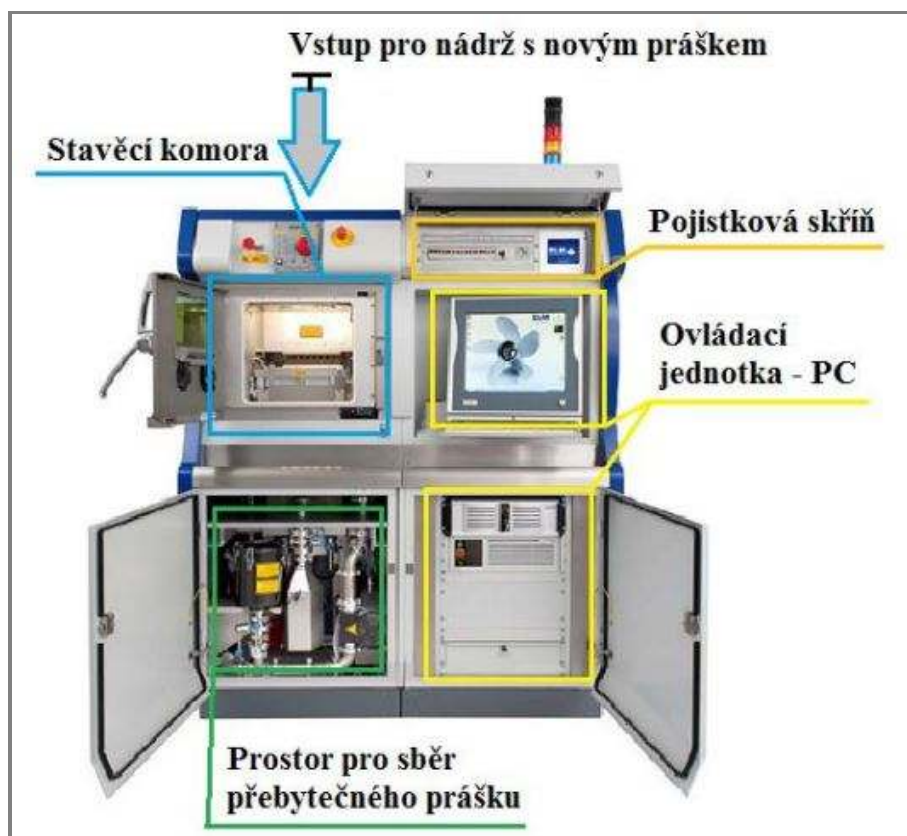
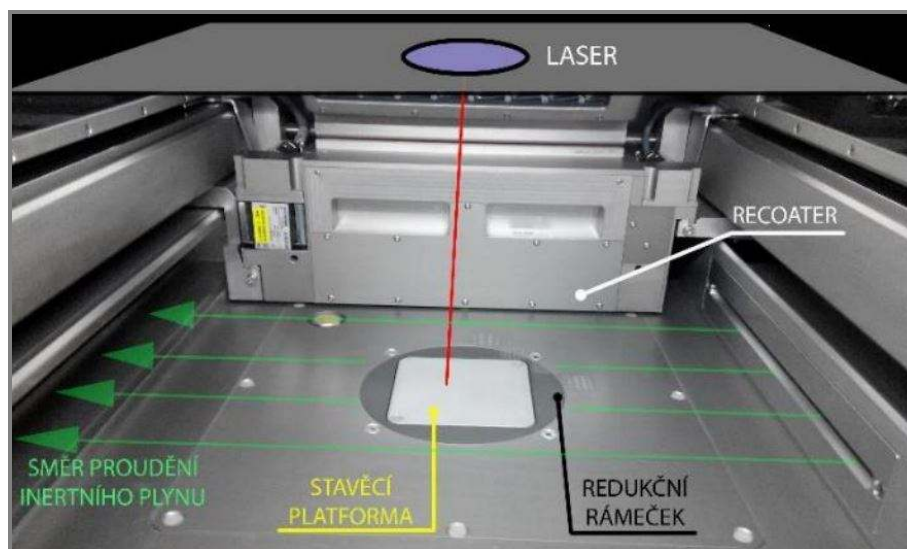
K zpracování materiálu je použito zařízení SLM 280^{HL} od německé firmy SLM Solutions GmbH. Jde o zařízení zpracovávající kovové materiály aditivní technologií SLM pomocí vláknového ytterbiového laseru. V tabulce 4.1 jsou uvedeny základní parametry zařízení SLM 280^{HL}.

Obr. 4.1 Parametry zařízení SLM 280^{HL} [43]

Stavební prostor	(mm ³)	(X,Y,Z) 280x280x350
Tloušťka vrstvy	(μm)	20 - 75
Produktivita	(cm ³ /h)	35
Max. skenovací rychlost	(m/s)	15
Průměr ohniska svazku	(μm)	82
Hmotnost	(kg)	1000
Zdroj inertního plynu	(l/min)	2,5 Ar/N ₂
Vláknový laser	(W)	YLR - Faser - Laser 400
Rozměry	(mm)	(D x V x Š) 1800x1900x1000

Na obrázku 4.2 je zobrazeno zařízení SLM 280^{HL}. Skládá se ze stavěcí komory, která je nad prostorem pro sběr přebytečného prášku. Plnicí otvor pro prášek je umístěn shora zařízení. V pravé části se nachází pojistková skříň a pod ní ovládací jednotka s počítačem.

Hlavní částí výrobního procesu je stavěcí komora, která je na obrázku 4.3. V horní části komory je okno, kterým je přiveden laserový paprsek. Pomocí nanašeče

Obr. 4.2 Pohled zepředu použitého zařízení SLM 280^{HL} [48]Obr. 4.3 Vnitřní komora použitého zařízení SLM 280^{HL} [48]

prášku (recoater), který se pohybuje na lineárním vedení, je nanášena rovnoměrná vrstva prášku. Po nanesení vrstvy přepadá přebytečný prášek do prostoru pod stavěcí komorou. Tento prášek může být poté znovu použit. V těsné blízkosti nad stavěcí platformou proudí inertní plyn, který odvádí spaliny a nečistoty vzniklé během procesu tavení prášku. Stavba dílu je realizována na stavěcí platformu, jejíž vertikální posuv je vymezen redukčním rámečkem.

4.2.2 Mikroskop Olympus SZX7

K prvotní analýze struktury, povrchu vzorků a kontinuity návarů je použit mikroskop Olympus, který disponuje přiblížením v rozsahu 7(0,8x - 5,6x). K mikroskopu je připojen fotoaparát Canon 1200D, který snímá snímky a následně je odesílá do počítače. Vyhodnocení snímků probíhá v programu QuickPHOTO MICRO 3.1. Osvětlení vzorků je realizováno čtyřmi segmenty postranních diod s měnitelnou intenzitou a možností jejich natočení.

4.2.3 Mikroskop Olympus GX50

K hodnocení struktury příčného řezu návarů byl použit mikroskop Olympus v laboratořích na Ústavu materiálového inženýrství. Mikroskop disponuje středovým osvětlením, které je vhodnější oproti stranovému a zvětšením až 1000x. Snímky z mikroskopu jsou zpracovány v programu NIS Elements AR.

4.2.4 Mikroskop Zeiss Axio Observer Z1m

K detailnímu hodnocení porozity a struktury objemových a tenkostěnných vzorků byl použit mikroskop Zeiss v laboratořích na Ústavu materiálového inženýrství. Mikroskop disponuje středovým osvětlením. Snímky z mikroskopu Zeiss byly následně použity pro vyhodnocení porozity objemových vzorků v programu ImageJ. Výhodou mikroskopu je automatické spojování snímků při focení větších vzorků.

4.2.5 3D skener ATOS Triple Scan

Pomocí 3D skeneru budou digitalizovány tenkostěnné vzorky a následně na digitalizovaných datech proběhne měření jejich rozměrů v programu GOM Inspect V8. Pro skenování budou použity objektivy s měřícím objemem 60x45x35 mm. Přesnost skeneru je 0,001 mm a vzdálenost naměřených bodů 0,017 mm.

4.2.6 Trhací stroj Zwick Z250

Pro určení hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, modulu pružnosti, tažnosti a zúžení bude použit trhací stroj Zwick, který je dostupný na Ústavu materiálového inženýrství. Maximální zatížení, které je schopen vyvodit, je 150kN.

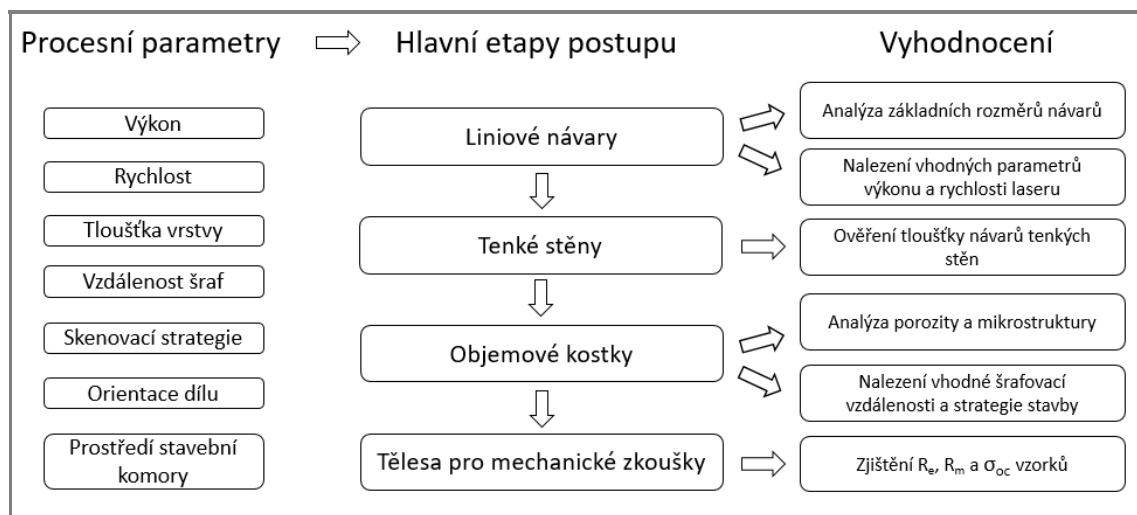
4.2.7 Metalografický výbrus

Pro analýzu vyrobených vzorků (porozity a mikrostruktury) je nutné sledovat rovinu řezu v objemu vzorku. Metalografický výbrus je realizován na bruskách dostupných na Ústavu materiálového inženýrství. Výbrus je prováděn brusnými papíry až do zrnitosti 4000 a následně je leštěn na leštících plátnech. Pro sledování mikrostruktury je vyleštěný vzorek naleptán leptadlem Fuss o složení: HF-7,5 ml, HCl-25 ml, HNO₃-8 ml, destilovaná voda-1000 ml.

4.3 Experiment

Postup experimentálního stanovení procesních parametrů pro slitinu AlSi7Mg0,6 vychází ze současného stavu poznání aditivní výroby hliníkových slitin. Schématické znázornění plánovaného postupu práce je na obrázku 4.4. Prvním krokem bude návarový test, z kterého se určí výkon a rychlost laseru pro dosažení kontinuálního návaru bez vzniku nespojitostí, balling efektu a deformací. Nalezení vhodných parametrů pro rozměrově vhodný a kontinuální návar umožní přistoupit k stavbě tenkostěnných a objemových vzorků. U tenkostěnného testu budou dále zkoumány perspektivní procesní parametry z návarového testu. Proměnným parametrem u objemového testu bude vzdálenost šraf při již určených parametrech výkonu a rychlosti laseru zjištěných z návarového a tenkostěnného testu. U vzorků bude přednostně sledován průběh stavby a jejich procentuální pórovitost. Následně se z finálně určených procesních parametrů vyrobí zkušební vzorky pro tahové a únavové testy a testovací díly. Experimenty jsou limitovány maximálními rozměry platformy 98x98 mm. Tloušťka vrstvy je stanovena na 50 μm . Teplota platformy je po celou dobu experimentu 120°C.

Vytvoření dat a jejich export do formátu STL bude proveden v CAD softwaru. Před spuštěním výroby je nutné každému vzorku v programu Magics určit jeho procesní parametry.

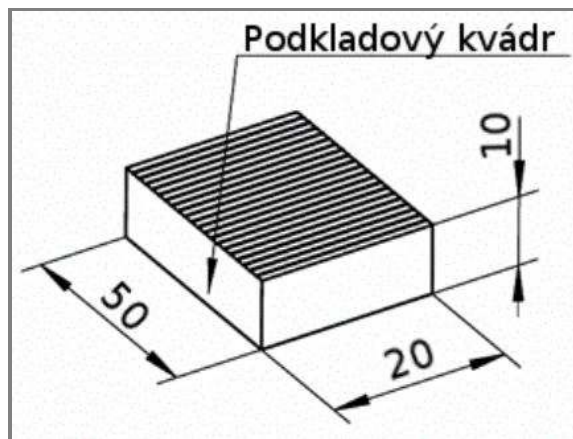


Obr. 4.4 Schématické znázornění plánu práce

4.3.1 Návarový test

Cílem návarového testu je určit procesní parametry pro tvorbu kvalitního návaru. Hlavními použitými parametry návarového testu, ovlivňující kvalitu návaru, jsou výkon a rychlost laseru. Při nanášení první vrstvy prášku není 100% jistota, že nanesená vrstva má stanovenou tloušťku 50 μm . Tloušťka vrstvy se stabilizuje až po nanášení určitého počtu vrstev. Pro účely experimentu je potřeba zajistit přesnou tloušťku vrstvy prášku již pro první vrstvu. Toho se dá dosáhnout přesným přebroušením stavěcí platformy nebo provedením testu návarů na podkladový kvádr, díky čemuž dojde k stabilizaci nanášené vrstvy prášku a bude možné test realizovat. Pro experiment byla použita druhá varianta. Podkladový kvádr s rozměry je na obrázku

4.5. Na každém kvádru je čtyřicet jednotlivých návarů, z nichž každé dva mají stejné procesní parametry, lišící se pouze směrem skenování (po proudu atmosféry, proti proudu atmosféry). Při tvorbě návarových vzorků byla použita geometrie obdélníku. V každém materiálu pak bylo vypnuto vnitřní šrafování a zůstala pouze kontura.



Obr. 4.5 Podkladový kvádr návarového testu

Jednotlivé návary budou vyfoceny z vrchního pohledu a bude hodnocena jejich kontinuita. Podkladové kvádry budou rozřezány v příčném řezu, aby bylo možné sledovat příčný řez návarů. Na každém návaru bude sledována výška, šířka, hloubka průvaru a úhel spojení se substrátem v programu KLONK measurement. Hodnotící kritéria návarů budou uvaženy dle práce [54], která se zabývala hodnocením návarů pro materiál AlSi10Mg. Z vyhodnocených dat proběhne následně selekce návarů pro použití v dalším výzkumu.

4.3.2 Tenkostěnný test

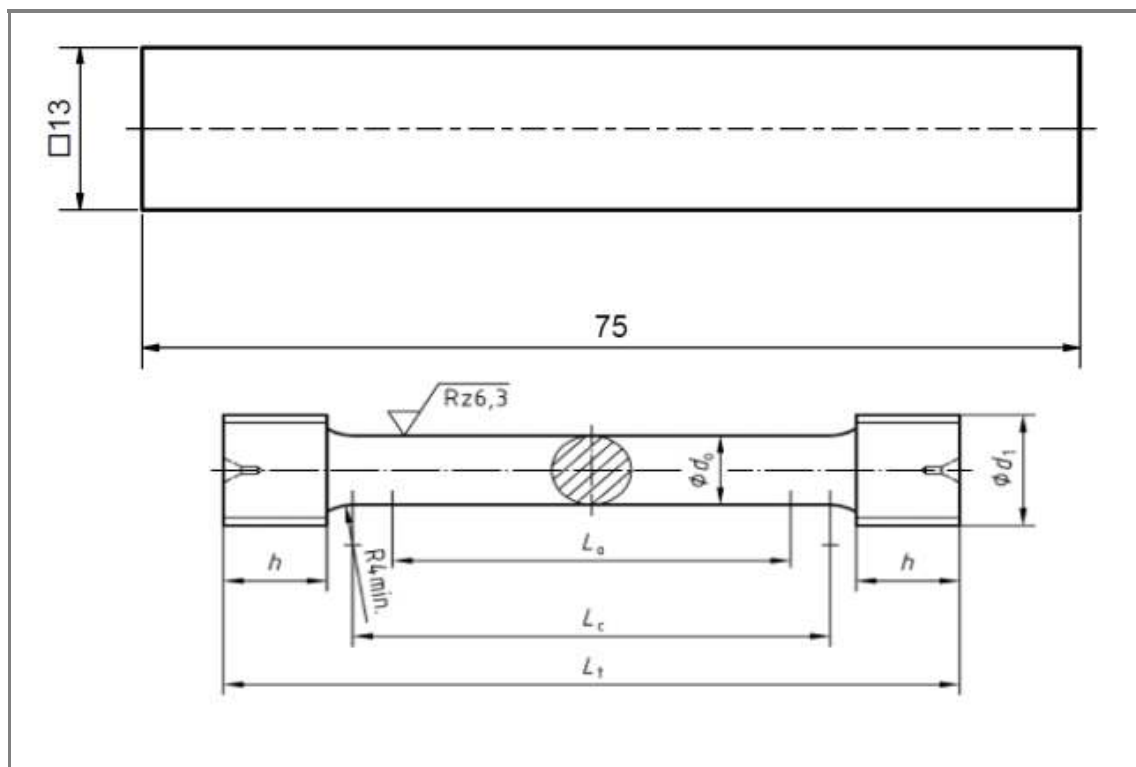
Tenkostěnný test navazuje na návarový test a dále zkoumá chování jednotlivých návarů při tvorbě tenkých stěn. Cílem je ověřit vhodné parametry získané z návarového testu. Testovací vzorky tvoří boční stěny krychle o rozměrech 13x13x10 mm. Vyrobené vzorky budou naskenovány a proběhne měření tloušťky stěn na naskenovaných datech. Po odřezání vzorků z platformy bude proveden metalografický výbrus příčných řezů stěn a změřena tloušťka stěn na mikroskopu. Výsledkem tenkostěnného testu bude výběr nejperspektivnějších procesních parametrů pro stavbu objemových dílů.

4.3.3 Objemový test

Cílem experimentu s objemovými vzorky je optimalizovat procesní parametry vycházející z tenkostěnného testu tak, abychom dosáhli vzorků s co nejmenší procentuální pórovitostí. Významnou roli bude hrát i použitá strategie skenování a zvolená vzdálenost šraf. Pro tento experiment se použijí kostky o rozměrech 5x5x10 mm a 13x13x6 mm. Výsledkem tohoto testu bude závislost porozity vzorků na procesních parametrech a bude změřena mikrotvrдость pro jednotlivé vzorky na tvrdoměru LECO LM 247AT. Na základě nejlepších výsledků budou určeny procesní parametry na stavbu vzorků pro mechanické testování.

4.3.4 Vzorky pro mechanické testování

Pro získání mechanických vlastností materiálu vyrobeného dle daných procesních parametrů byly postaveny vzorky pro mechanické testování. Pro tahovou zkoušku byly vyrobeny vzorky s rozměry 13x13x75 mm viz obr.4.6 nahoře. Tyto vzorky byly následně obrobeny na rozměr zúžené části $\varnothing 6 \times 30$ mm dle DIN 50125 viz obr.4.6 dole.



Obr. 4.6 Tahový vzorek vyrobený technologií SLM před obrobením (nahoře), obrobený tahový vzorek dle DIN 50125 (dole) [14]

4.3.5 Příprava experimentu

Prvním krokem před zahájením výroby je příprava dat pro SLM zařízení. V libovolném CAD softwaru se vytvoří 3D modely určené k výrobě. Prostřednictvím programu Magics se vytvoří data pro zařízení SLM ve formátu .slm. Ta se následně nahrají do ovládací jednotky zařízení a výroba je připravena ke spuštění. Tento krok se nazývá pre-processing.

4.3.6 Příprava zařízení

Důležitou součástí přípravy je vyčištění celého zařízení v místech, kde dochází ke kontaktu s práškem. To se týká stavěcí komory, hlavního zásobníku prášku i nanášecího zařízení, stejně tak přepadů trubek a vlnovců sloužících pro odvádění prášku. K čištění se používají papírové utěrky s izopropylalkoholem (IPA).

Pro experimentální ověření se používá menší stavěcí platforma ve spojení s posuvným válcem a redukčním rámečkem. V softwaru je potřeba nastavit použití menší

platformy, aby nedošlo ke kolizi. Zarovnání platformy se kontroluje pomocí rovného břitu, který se střídavě přikládá na redukční rámeček a platformu, dokud nedojde k zarovnání. Tyto úkony je potřeba provést před každou stavbou. Stavěcí platforma se vyhřívá pro hliníkové slitiny na teplotu 120 °C. Po uzavření komory je nastaven přetlak 12 mbar a hladina kyslíku snížena pod 0,2 % v důsledku přivedení dusíku. Skenování první vrstvy stavby je záměrně jedenkrát zopakováno, aby se dosáhlo lepšího spojení se substrátem.

5 VÝSLEDKY

5.1 Mechanické vlastnosti referenčního materiálu

Pro určení mechanických vlastností materiálu AlSi7Mg0,6 v litém stavu byly vyhledány vhodné články, které se zjištěním mechanických vlastností slitiny zabývaly.

Chen [49] ve svém článku zkoumal mechanismus lomu materiálu AlSi7Mg0,6 v odlitém i tepelně zpracovaném stavu. Vyrobené tahové vzorky měly průměr 10 mm a délku zúžené části 15 mm. Maximální mez pevnosti pro odlitý vzorek byla 176 MPa, mez kluzu 163 MPa a poměrné prodloužení 1,47 %. Vzorek s tepelným zpracováním T6 dosáhl maximální meze pevnosti 308 MPa, mez kluzu 234 MPa a poměrné prodloužení 5,43 %.

V další práci Es-Said [50] porovnával odlitky z materiálu AlSi7Mg0,6 v různém stavu tepelného zpracování T6. Tahové vzorky měly průměr 0,5" (12,7 mm) a délku v zúžené části 2" (50,8 mm). Odlitý vzorek bez tepelného zpracování dosáhl maximální meze pevnosti 180 MPa, meze kluzu 85 MPa a poměrného prodloužení 5,1 %. Díky správné optimalizaci teplot při tepelném zpracování měl nejlepší vzorek maximální mez pevnosti 357 MPa, mez kluzu 305 MPa a poměrné prodloužení 6,1 %. Hodnoty mechanických vlastností z třetího článku jsou z materiálového webu dostupného na internetu [53].

Tab. 5.1 Tabulka s mechanickými hodnotami materiálu z příslušných článků.
Článek 1 - [49], 2 - [50], 3 - [53]

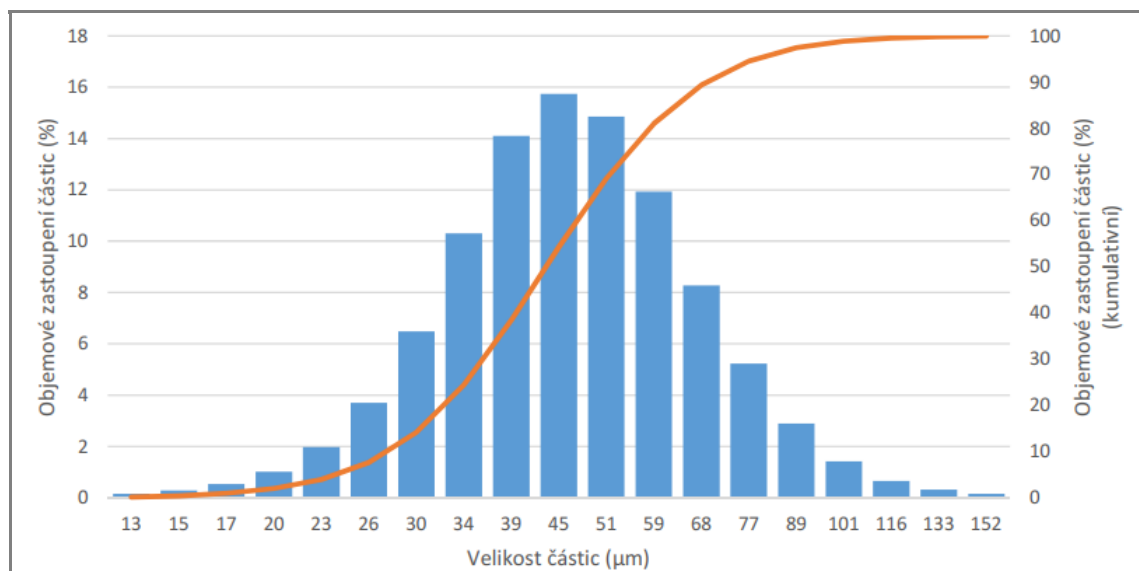
Článek	Mez pevnosti (MPa)	Mez kluzu (Mpa)	Prodloužení (%)	Poznámka
1	176	163	1,47	
	308	234	5,43	T6
2	180	85	5,1	
	357	305	6,1	T6
3	350	270	3,7	T6

5.2 Analýza prášku

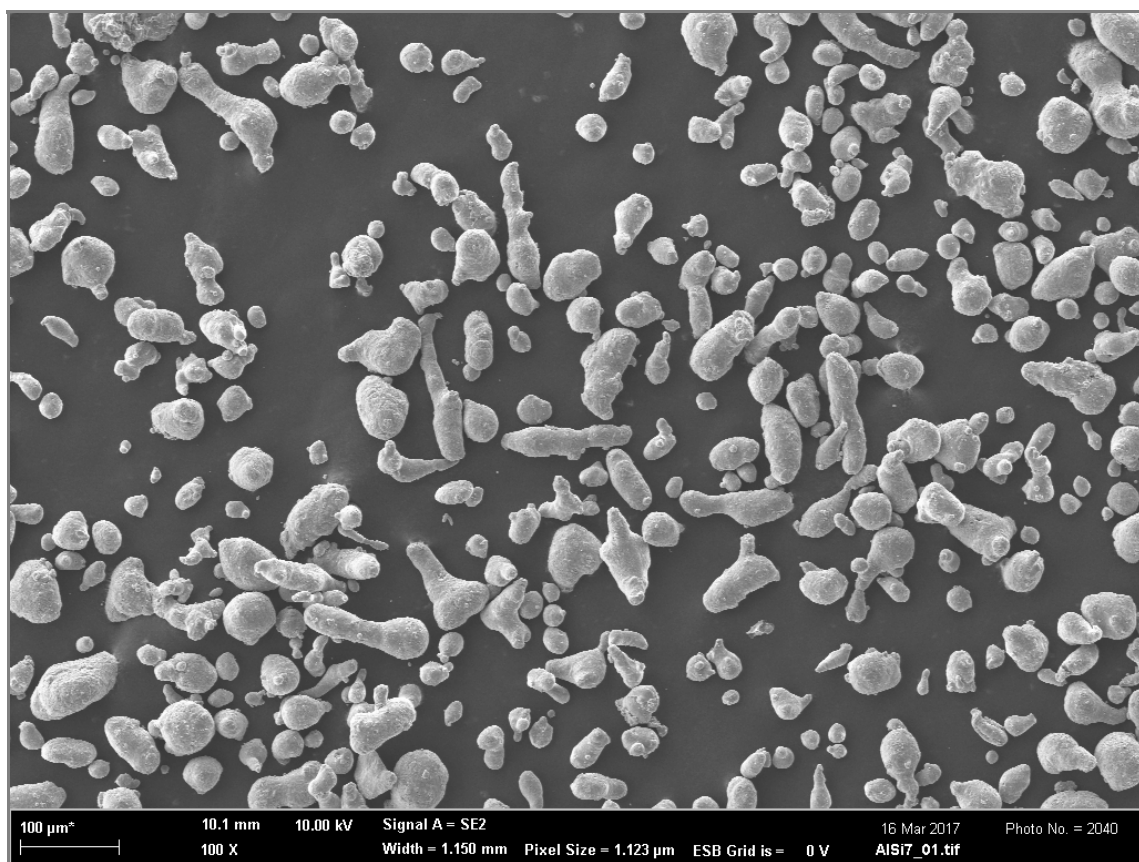
Zakoupený prášek od firmy SLM Solutions byl podroben analýze rozložení a velikosti částic. Nejčastěji jsou v objemu zastoupeny částice s velikostí 45 μm . Průměrná velikost částic prášku je 49,6 μm . Distribuce velikosti částic prášku je rovnoměrná. Prášek obsahuje z 69 % částice menší než 50 μm , které se účastní tvorby rovnoměrné vrstvy o výšce 50 μm . Výrobce uvádí, že 10 % prášku by mělo být do velikosti částic 20 μm , 50 % prášku do velikosti 40 μm a 90 % prášku do velikosti 60 μm . Analýza ukázala, že 10 % prášku je až do velikosti 30 μm , 50 % prášku do velikosti 45 μm a 90 % prášku do velikosti 97 μm . Největší částice v prášku dosahují velikosti až 152 μm . Objemové zastoupení částic v prášku je zobrazeno na obr. 5.1.

Další test se zabýval kontrolou kruhovitosti částic. Výrobce uvádí, že by prášek měl mít kulový tvar. Test pod elektronovým mikroskopem prokázal, že částice

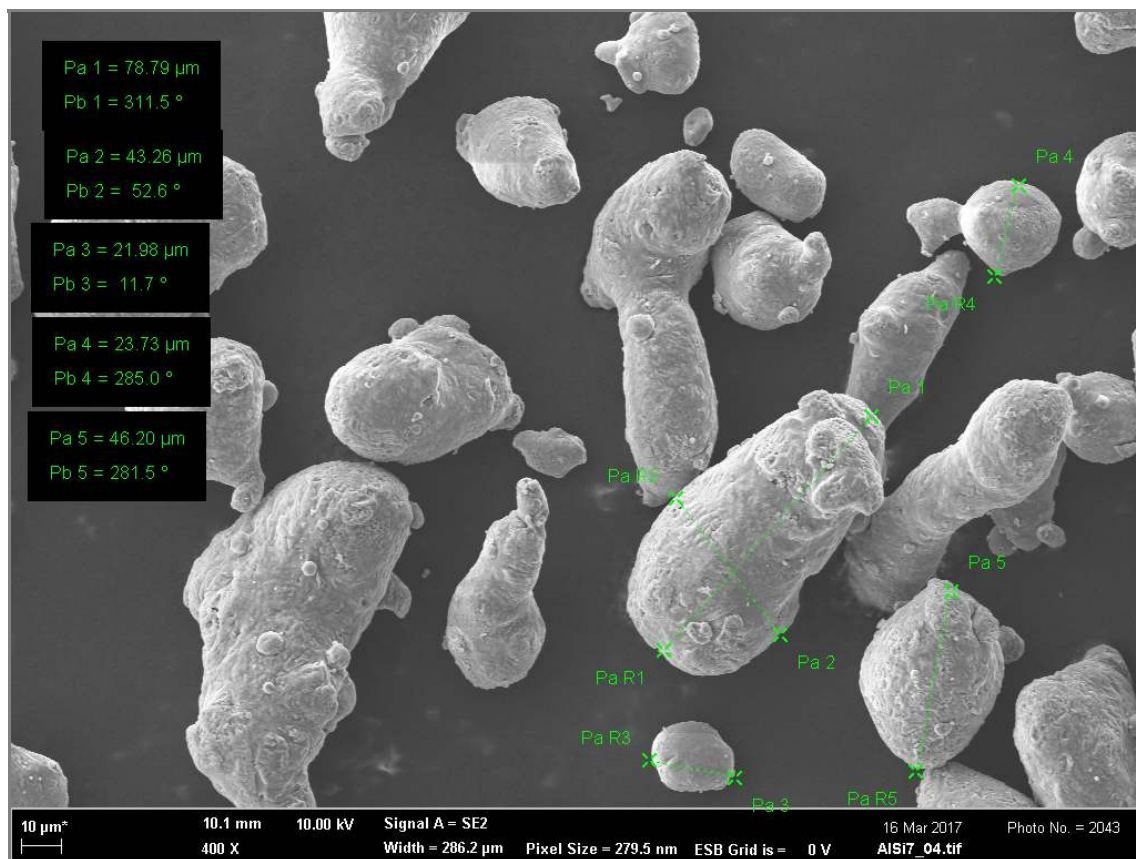
prášku nejsou ve všech případech kulové. Některé částice jsou spíše protáhlého tvaru. Makroskopický pohled na tvar částic je na obrázku 5.2 a detail částic na obrázku 5.3.



Obr. 5.1 Histogram rozložení částic prášku AlSi7Mg0,6 od SLM Solutions



Obr. 5.2 Makroskopický snímek tvaru částic



Obr. 5.3 Detailní snímek tvaru částic

5.3 Návarový test

5.3.1 Příprava testu

Pro návarový test byl použit rozsah parametrů o výkonu laseru v rozmezí od 175 W do 400 W a rychlosti skenování v rozmezí od 200 mm/s do 2000 mm/s. Na platformu bylo umístěno dvanáct podkladových kvádrů, na které bylo navařeno 120 návarů s různými kombinacemi parametrů výkonu a rychlostmi laseru. Pro návrh vhodných kombinací procesních parametrů se vycházelo z předešlých prací, kde pro vzorky s největší relativní hustotou byla hodnota vstupní energie do procesu v rozmezí od 4,76 do 10 J/mm², dle vzorce 2.1 bez zahrnutí vzdálenosti šraf. Na obrázku 5.4 je zobrazena mapa procesních parametrů pro návarový test. Hodnota vstupní energie do procesu se pohybuje od 3,5 do 20 J/mm². Je tak zajištěno, že mimo vyhovující návary budou vyrobeny i návary nevyhovující, a bude tak možnost pozorovat hranici mezi vhodnými a nevhodnými procesními parametry.

5.3.2 Výsledky

Naměřené rozměry návarů byly zpracovány do grafů v závislosti na rychlosti skenování pro každý výkon a směr skenování. Výsledné křivky byly proloženy spojnici trendu. Jak lze vidět z grafů 5.5, šířka návaru a hloubka průvaru mají klesající tendenci v závislosti se zvětšující se skenovací rychlostí. Výška návaru nevykazuje

Vstupní energie (J/mm ²)		Skenovací rychlost (mm/s)																			
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
Výkon laseru (W)	175	17,5	11,7	8,8	7,0	5,8	5,0	4,4	3,9	3,5											
	200	20,0	13,3	10,0	8,0	6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6										
	225		15,0	11,3	9,0	7,5	6,4	5,6	5,0	4,5	4,1	3,8									
	250		16,7	12,5	10,0	8,3	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,2	3,8								
	275			13,8	11,0	9,2	7,9	6,9	6,1	5,5	5,0	4,6	4,2	3,9							
	300			15,0	12,0	10,0	8,6	7,5	6,7	6,0	5,5	5,0	4,6	4,3	4,0	3,8					
	325				13,0	10,8	9,3	8,1	7,2	6,5	5,9	5,4	5,0	4,6	4,3	4,1	3,8				
	350				14,0	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	6,4	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	4,1	3,9			
	375					12,5	10,7	9,4	8,3	7,5	6,8	6,3	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	4,2	3,9		
	400					13,3	11,4	10,0	8,9	8,0	7,3	6,7	6,2	5,7	5,3	5,0	4,7	4,4	4,2	4,0	

Obr. 5.4 Mapa procesních parametrů návarového testu

žádnou závislost na základě měnící se skenovací rychlosti. Její hodnota se pohybuje převážně nad 50 μm . Průměrná hodnota výšky všech návarů je 62 μm se směrodatnou odchylkou 32 μm .

Pro výběr vhodných návarů, jejichž parametry budou dále testovány, byly určeny hodnotící kritéria. Hodnocena byla kontinuita, rozměr návaru a přítomnost porů nebo trhlin. Na základě těchto hodnocených prvků byly návary rozděleny do tří skupin. První skupina nevhodných návarů (v procesní mapě šedou barvou) neměla požadované rozměry (výška > 30 μm , průvar = 50 - 160 μm a úhel napojení = 90 - 170°) anebo obsahovala póry a trhliny. Druhá skupina (v procesní mapě žlutou barvou) obsahovala návary, které byly rozměrově vhodné, ale nekontinuální. Třetí skupina (v procesní mapě zelenou barvou) obsahovala návary vhodné z hlediska kontinuity i rozměrů.

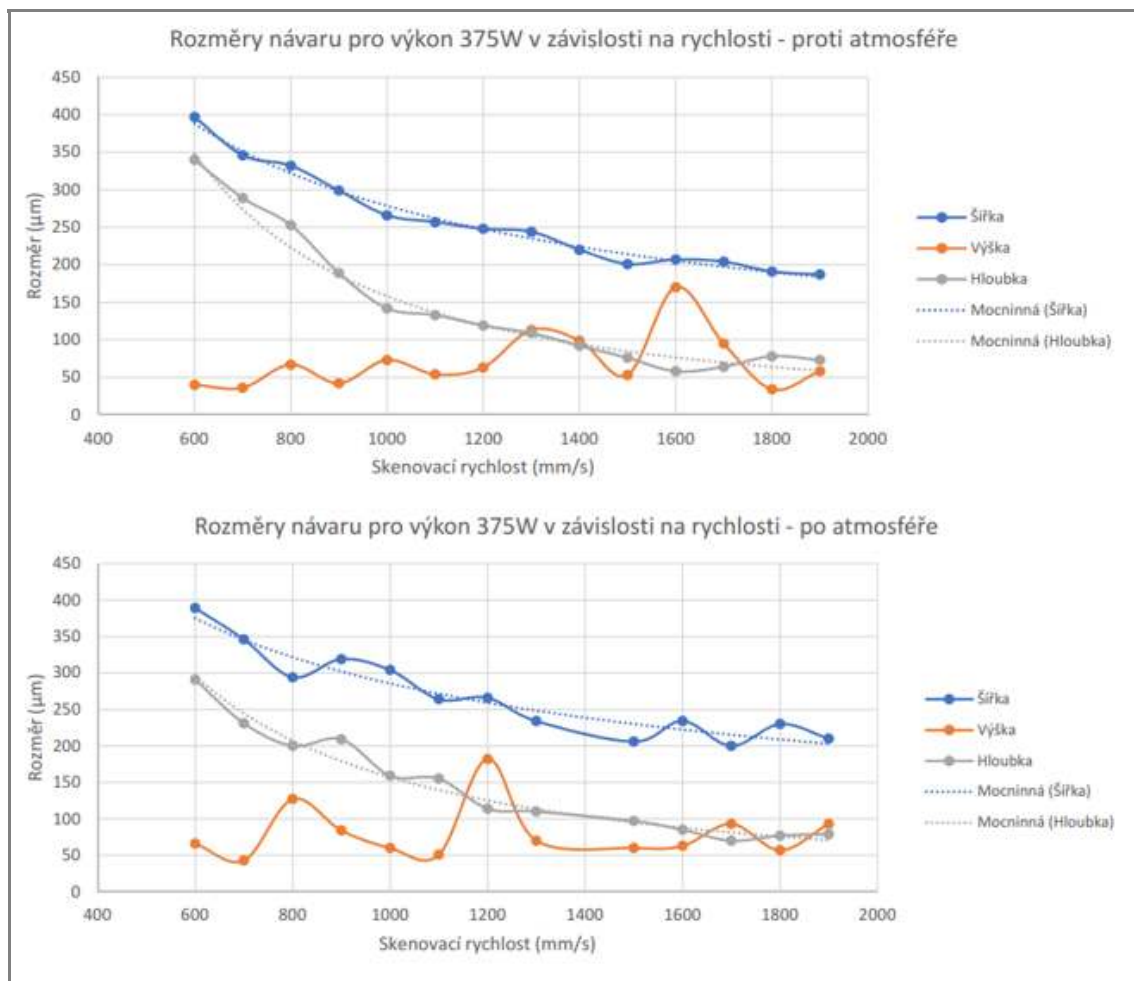
Na obrázku 5.6 je procesní mapa s barevně odlišenými návary podle hodnotící skupiny. Vhodné návary jsou označeny zeleně, rozměrově vhodné ale nekontinuální žlutě a nevhodné návary šedě. Z mapy jde vidět, že výskyt oblasti vhodných návarů je primárně při výkonech vyšších než 300 W a rychlostech mezi 900 - 1200 mm/s.

V první skupině rozměrově nevhodných návarů byly ty s vysokou a nízkou vstupní energií. Návary s vysokou vstupní energií se projevily velkým průvarem a občasným výskytem porů. Návary s nízkou vstupní energií měly malou výšku, špatný úhel napojení nebo malý průvar. Druhá skupina návarů se vyznačovala vhodnými rozměry, ale při vrchním pohledu na návar byly vidět nespojitosti v jeho kontinuitě. Třetí skupina obsahuje návary, které byly rozměrově vhodné a kontinuální.

Na obrázku 5.2 je ukázka návarů z každé skupiny.

5.3.3 Zhodnocení

V rámci návarového testu bylo vyrobeno 120 návarů s různými kombinacemi procesních parametrů. Cílem testu bylo reflektovat běžný proces výroby. Toho bylo dosaženo navařením jednotlivých návarů na podkladový kvádr, čímž bylo zaručeno, že vrstva, kde byly návary postaveny, měla 50 μm a také odvod tepla při tuhnutí návarů byl reálnější než při navaření návarů přímo na stavěcí platformu. Rozměrová analýza návarů ukázala, že s rostoucí skenovací rychlostí při konstantním výkonu laseru klesá šířka a průvar návaru. To je způsobeno klesající vstupní energií do procesu, která určuje velikost roztavené lázně tvořící výsledný návar. Výška návaru se při měnící se rychlosti skenování neměnila a pohybovala se nad hodnotou 50 μm . U některých návarů tato hodnota výrazně přesáhla průměr výšky, který byl



Obr. 5.5 Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro výkon 375 W. Graf nahoře zobrazuje rozměry pro návar skenovaný proti proudu atmosféry, dolní graf zobrazuje návar skenovaný po proudu atmosféry

Vstupní energie (J/mm ²)		Skenovací rychlost (mm/s)																		
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Výkon laseru (W)	175	17,5	11,7	8,8	7,0	5,8	5,0	4,4	3,9	3,5										
	200	20,0	13,3	10,0	8,0	6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6									
	225		15,0	11,3	9,0	7,5	6,4	5,6	5,0	4,5	4,1	3,8								
	250			16,7	12,5	10,0	8,3	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,2	3,8						
	275				13,8	11,0	9,2	7,9	6,9	6,1	5,5	5,0	4,6	4,2	3,9					
	300					15,0	12,0	10,0	8,6	7,5	6,7	6,0	5,5	5,0	4,6	4,3	4,0	3,8		
	325						13,0	10,8	9,3	8,1	7,2	6,5	5,9	5,4	5,0	4,6	4,3	4,1	3,8	
	350							14,0	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	6,4	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	3,9
	375								12,5	10,7	9,4	8,3	7,5	6,8	6,3	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4
	400									13,3	11,4	10,0	8,9	8,0	7,3	6,7	6,2	5,7	5,3	4,7

Obr. 5.6 Procesní mapa návarového testu s ohodnocenými návary

62 μm . To může být způsobeno tzv. balling efektem, který se projevuje vznikem kuliček na vzniklém návaru. Další možností tak velké výšky návaru může být fakt, že poslední vrstva prášku pro navaření samotných návarů byla nanášena na povrch, který nebyl dokonale rovný. Mohlo se stát, že do místa, kde vznikla nerovnost povrchu prohlubeň, se nahrnulo více prášku, který způsobil výrazně větší výšku návaru a v tomto místě následně proběhlo vyhodnocení rozměrů.

Z analýzy výsledků návarového testu vyplynulo celkem 16 vhodných kombinací

Tab. 5.2 Ukázka návarů jednotlivých skupin. (a) - (d) zobrazuje vrchní pohled na návary, (e) - (h) pohled v příčném řezu

	Vrchní pohled	Příčný průřez	Parametry
Skupina 1	(a) Šířka 397 μm	(e) Výška 66 μm Průvar 291 μm	Výkon laseru 375 W Rychlost skenování 600 mm/s
	Šířka 389 μm	Výška 40 μm Průvar 340 μm	
Skupina 1	(b) Šířka 238 μm	(f) Výška 0 μm Průvar 74 μm	Výkon laseru 200 W Rychlost skenování 500 mm/s
	Šířka 204 μm	Výška 69 μm Průvar 75 μm	
Skupina 2	(c) Šířka 247 μm	(g) Výška 74 μm Průvar 84 μm	Výkon laseru 350 W Rychlost skenování 1600 mm/s
	Šířka 256 μm	Výška 104 μm Průvar 95 μm	
Skupina 3	(d) Šířka 242 μm	(h) Výška 63 μm Průvar 97 μm	Výkon laseru 350 W Rychlost skenování 1200 mm/s
	Šířka 234 μm	Výška 51 μm Průvar 134 μm	

návarů. Nejperspektivnější je oblast výkonu laseru od 325 do 400 W, která bude zkoumána za účelem dalšího výzkumu. V tabulce 5.3 je jejich podrobnější rozměrová specifikace. Potvrdil se předpoklad, že vhodné návary budou vznikat při vyšších výkonech laseru a rychlostech skenování, jak uvádí ve své práci Louvis [3]. Předpokládaný rozsah hodnot vstupní energie pro vhodný návar byl v rozmezí 4,76 - 10 J/mm². Reálné výsledky se do tohoto intervalu vešly v rozmezí 5 - 8 J/mm². Vý-

sledky návarového testu budou dále použity pro tenkostěnný test.

Tab. 5.3 Tabulka se specifikací rozměrů a procesních parametrů vybraných návarů

Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (mm/s)	Vstupní energie (J/mm ³)	Po proudě atmosféry				Proti proudě atmosféry			
			Šířka návaru (μm)	Výška návaru (μm)	Hloubka návaru (μm)	Úhel (°)	Šířka návaru (μm)	Výška návaru (μm)	Hloubka návaru (μm)	Úhel (°)
325	1000	6,50	268	38	136	152	284	53	148	157
350	900	7,78	285	44	155	162	296	81	154	118
350	1000	7,00	258	45	117	145	266	53	142	128
350	1100	6,36	257	48	137	135	273	51	154	143
350	1200	5,83	234	51	134	143	242	63	97	129
375	1000	7,50	304	60	159	155	266	73	142	113
375	1100	6,82	264	51	155	144	257	54	133	150
375	1200	6,25	266	182	114	117	248	63	119	150
375	1300	5,77	234	70	110	133	244	113	109	126
400	1000	8,00	328	97	93	141	269	78	135	122

5.4 Tenkostěnný test

5.4.1 Příprava testu

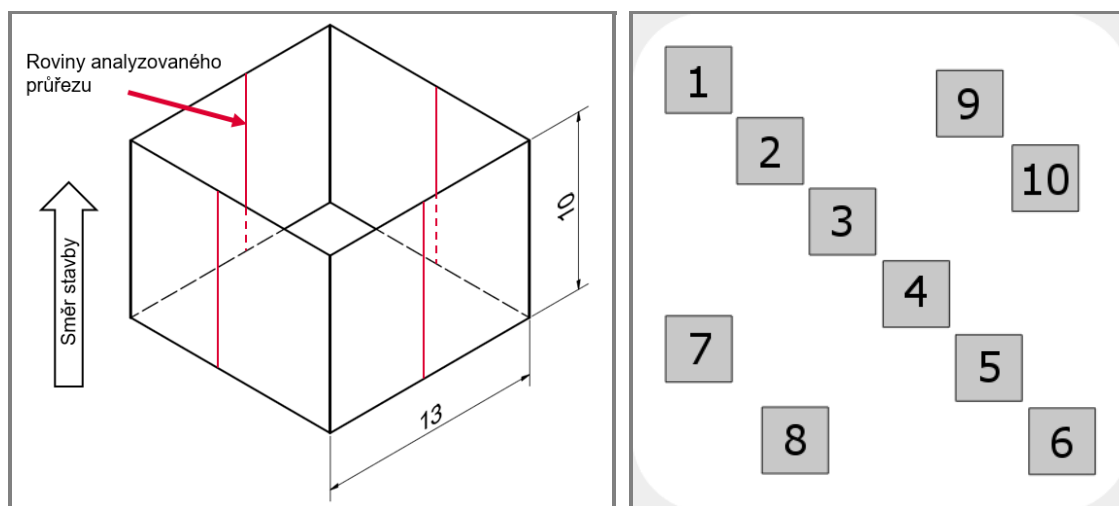
Cílem tenkostěnného testu je ověřit vhodné parametry získané z návarového testu a zkoumat změnu jejich rozměrů při stavbě jednonávarové stěny. Pro tenkostěnný test bylo vybráno 10 kombinací procesních parametrů, od výkonu laseru 325 do 400 W a rychlosti skenování od 900 do 1300 mm/s, zobrazených červeně na procesní mapě, viz obr. 5.7. Rozsah energie vstupující do procesu je v rozmezí od 6,3 do 8 J/mm². Testovací vzorky tvoří boční stěny krychle o rozměrech 13x13x10 mm, viz obr.5.8 vlevo a rozložení vzorků na platformě je na stejném obrázku vpravo. Vyrobené vzorky byly naskenovány a dále vybroušeny a vyfoceny na mikroskopu.

Vstupní energie (J/mm ²)		Skenovací rychlost (mm/s)																		
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Výkon laseru (W)	175	17,5	11,7	8,8	7,0	5,8	5,0	4,4	3,9	3,5										
	200	20,0	13,3	10,0	8,0	6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6									
	225		15,0	11,3	9,0	7,5	6,4	5,6	5,0	4,5	4,1	3,8								
	250		16,7	12,5	10,0	8,3	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,2	3,8							
	275			13,8	11,0	9,2	7,9	6,9	6,1	5,5	5,0	4,6	4,2	3,9						
	300			15,0	12,0	10,0	8,6	7,5	6,7	6,0	5,5	5,0	4,6	4,3	4,0	3,8				
	325				13,0	10,8	9,3	8,1	7,2	6,5	5,9	5,4	5,0	4,6	4,3	4,1	3,8			
	350					14,0	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	6,4	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	4,1	3,9	
	375						12,5	10,7	9,4	8,3	7,5	6,8	6,3	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	4,2	3,9
	400						13,3	11,4	10,0	8,9	8,0	7,3	6,7	6,2	5,7	5,3	5,0	4,7	4,4	4,2

Obr. 5.7 Procesní mapa návarového testu s vyznačenými parametry použitými v tenkostěnném testu

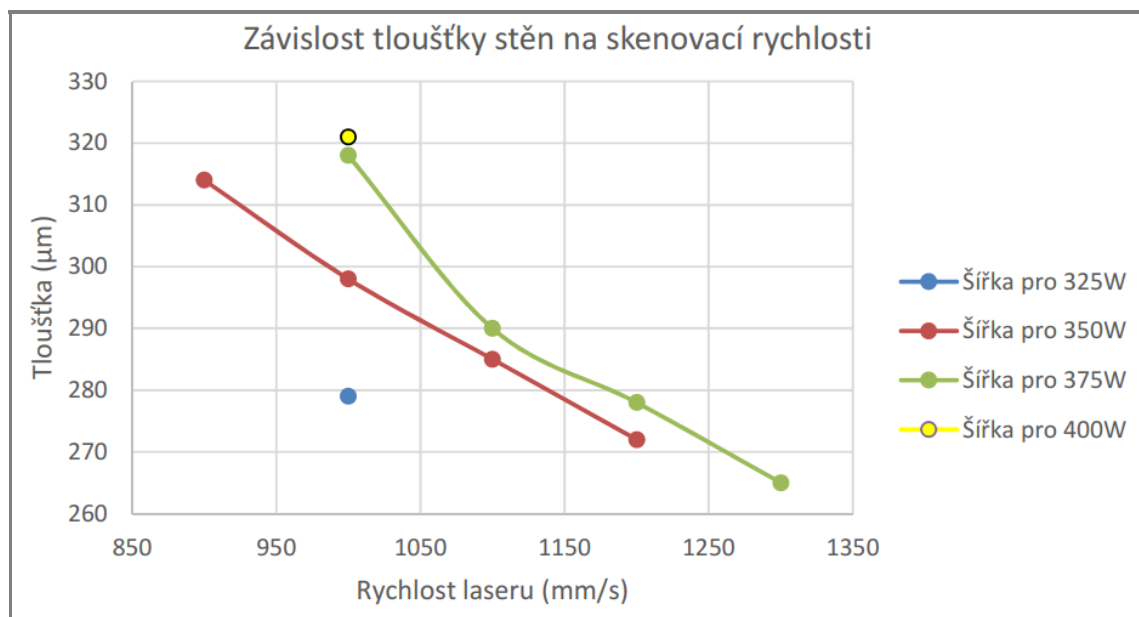
5.4.2 Výsledky

Ze zdigitalizovaných dat na skeneru Atos byla vypočtena průměrná šířka stěny. Graf 5.9 zobrazuje závislost tloušťky stěny na hodnotě skenovací rychlosti pro různé výkony laseru. Z grafu je zřejmá klesající tendence tloušťky stěny se vzrůstající



Obr. 5.8 Vlevo: Vzorek pro tenkostěnný test. Na obrázku je znázorněn směr stavby vzorku a roviny analyzovaného průřezu. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě. Číslo uprostřed vzorků znázorňuje jejich pořadové číslo

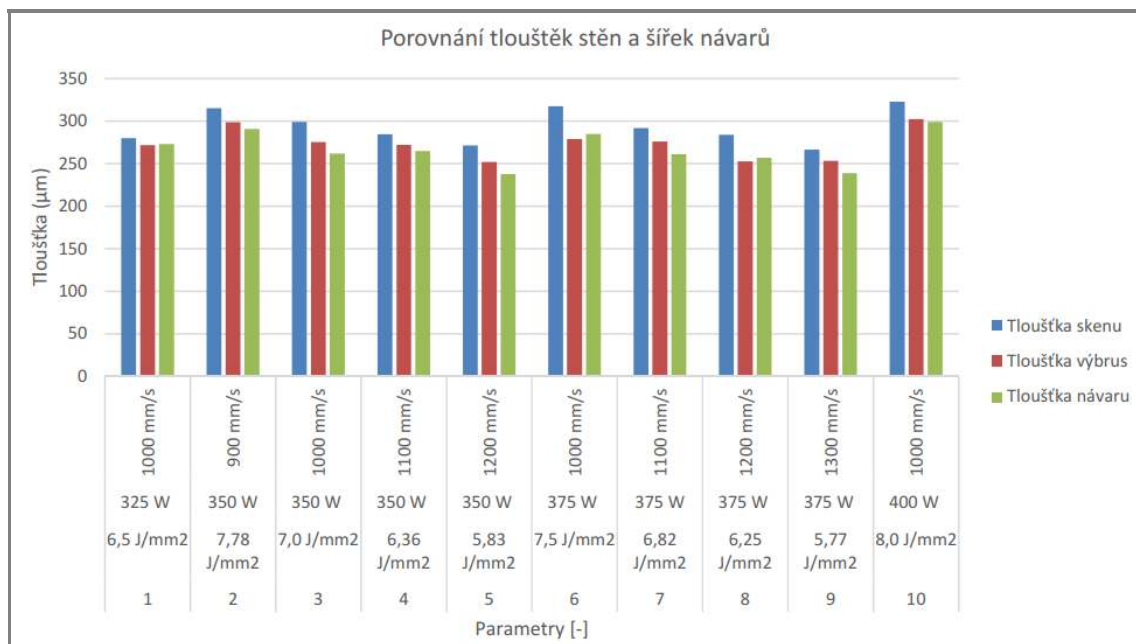
skenovací rychlostí. Pro skenovací rychlost 1000 mm/s je tloušťka stěny v grafu zobrazena pro výkon laseru 325, 350, 375 a 400 W. Lze vidět, že s rostoucím výkonem laseru se tloušťka stěny zvětšuje o 20 μm mezi výkonem 325 - 350 W, o 20 μm mezi výkonem 350 - 375 W a o 3 μm mezi výkonem 375 - 400 W.



Obr. 5.9 Graf závislosti tloušťky stěny na skenovací rychlosti pro jednotlivé výkony laseru

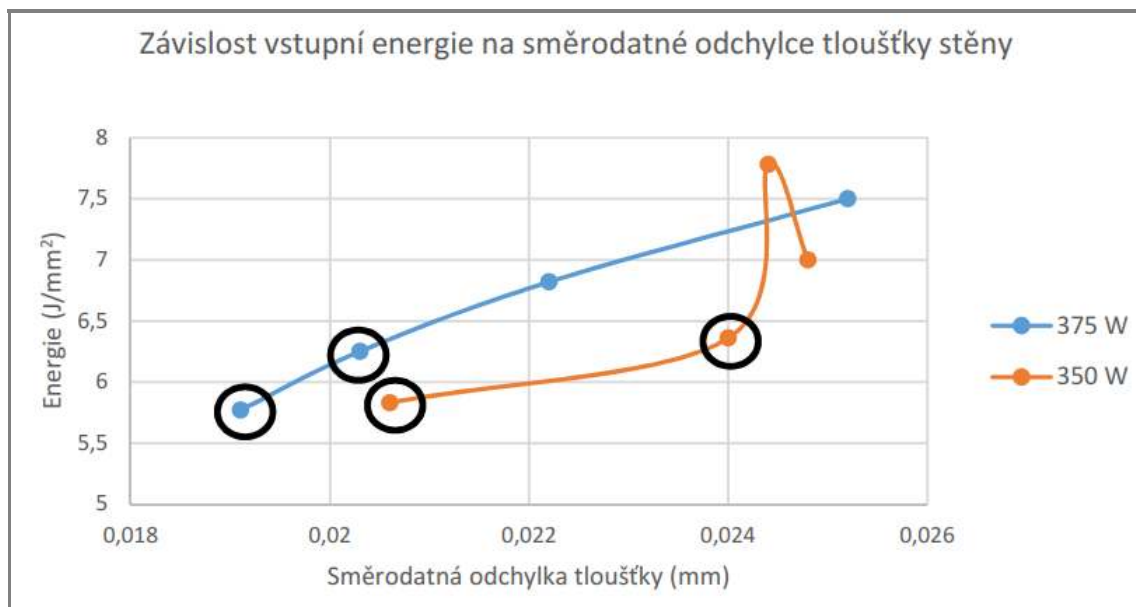
Šířka tenkostěnných vzorků vyhodnocených na vyleštěných vzorcích je zanesena do grafu 5.10 spolu s tloušťkou stěny z naskenovaných dat a šířkou návarů. Na tomto grafu lze vidět celkové porovnání všech hodnot tloušťek stěn a šířek návarů. Tloušťka stěn z vybroušených vzorků je ve většině případů větší než šířka stanovená v návarovém testu, ale menší než tloušťka z naskenovaných dat. V porovnání s šířkou návarů je tloušťka stěn z naskenovaných dat nejvíce odchýlená o 12,5 %, nejméně o 2,15 % a průměrně je o 8,5 % větší. V porovnání s tloušťkou stěn z naskenovaných

dat je tloušťka stěn z výbrusu nejvíce odchylená o 12 %, nejméně o 2,5 % a průměrně je o 6 % menší.



Obr. 5.10 Graf porovnání tlouštěk stěn z naskenovaných dat a výbrusů s šířkou návarů pro jednotlivé procesní parametry

Z naskenovaných dat stěn byl vytvořen graf 5.11 závislosti vstupní energie do procesu na směrodatné odchylce tloušťky stěn pro výkony 350 a 375 W. Z grafu lze vidět, že s rostoucí směrodatnou odchylkou se zvětšuje energie vstupující do procesu. Tento trend platí pro všechny hodnoty až na bod s hodnotou vstupní energie 7,78 J/mm².



Obr. 5.11 Graf závislosti vstupní energie do procesu na směrodatné odchylce tloušťky stěny

5.4.3 Zhodnocení

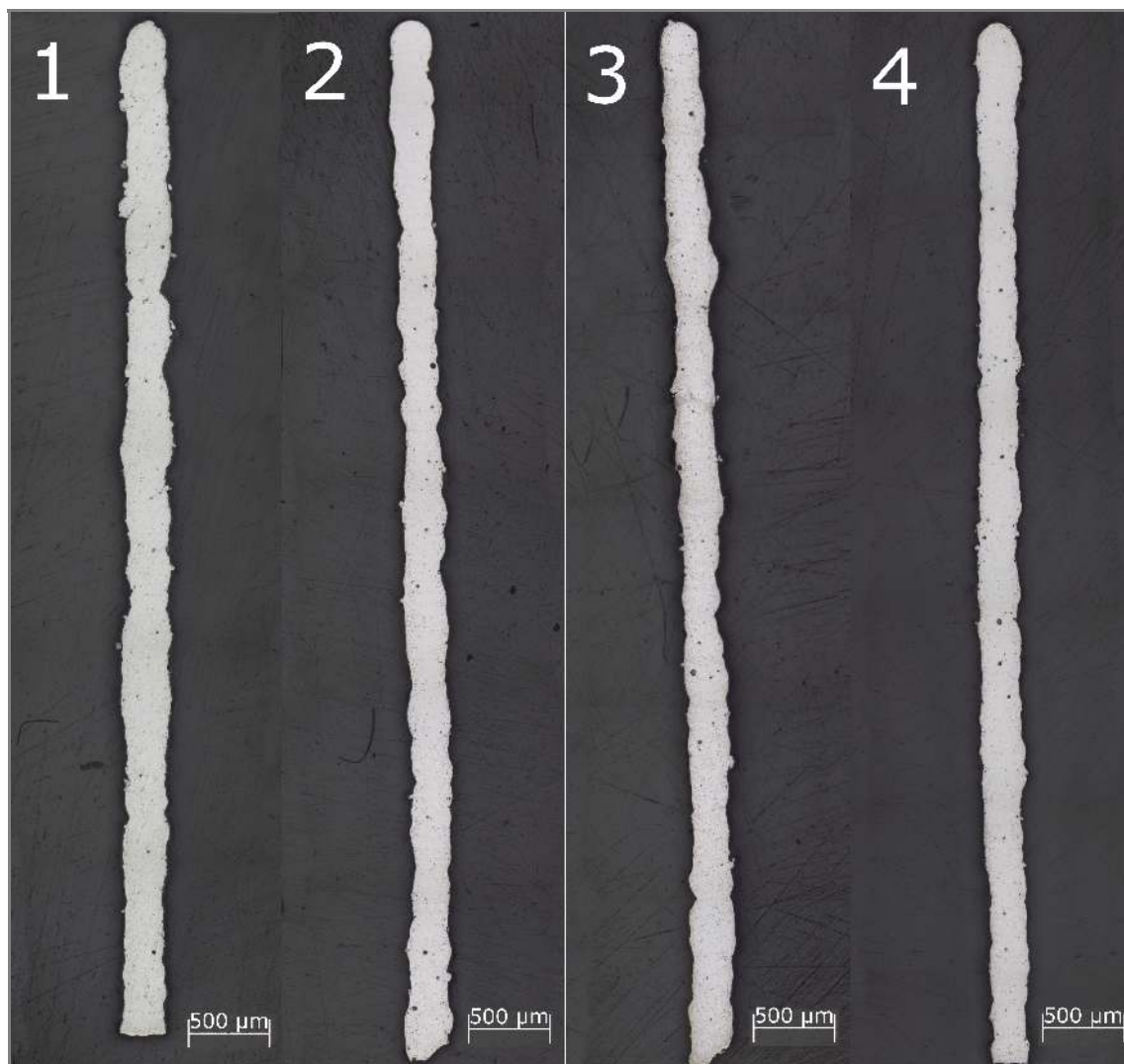
V rámci tenkostěnného testu bylo vyrobeno deset vzorků nejvhodnějších kombinací procesních parametrů vyhodnocených na základě výsledků z návarového testu. Trend klesajícího rozměru šířky s rostoucí skenovací rychlostí z návarového testu se potvrdil i při stavbě tenkých stěn. Tuto závislost lze vidět v grafu 5.9. Důvod klesající tloušťky je stejný jako v návarovém testu, kde byl tento trend zapříčiněn klesající hodnotou energie vstupující do procesu. Při konstantní hodnotě skenovací rychlosti 1000 mm/s a rostoucím výkonu laseru lze ve stejném grafu vidět nárůst tloušťky stěny. Pro výkon 325 - 350 W a výkon 350 - 375 W je nárůst šířky konstantní oproti nárůstu mezi výkony 375 - 400 W. Tento fakt může být způsoben změnou vektoru tuhnutí lázně při změně procesních parametrů a vliv většího výkonu se může projevit v jiném rozměru návaru než v jeho šířce.

V grafu 5.10 je zobrazeno porovnání tloušťek stěn vyhodnocených z naskenovaných dat, vybroušených vzorků a šířek návarů z návarového testu. Nejmenších hodnot dosahují šířky návarů. Tento fakt je způsoben větším odvodem tepla při navařování liniového návaru na podkladovou kostku než u stavby tenké stěny. Z toho důvodu se při navaření liniového návaru roztaví menší množství prášku, které tvoří výsledný návar. Rozdíl naměřených tloušťek stěn z naskenovaných dat a z hodnot změřených na výbrusu pod mikroskopem je pravděpodobně způsoben rozdílností obou měřících metod. Pro výpočet tloušťky jedné stěny z naskenovaných dat je použito průměrně 190 bodů po celé ploše stěny, kdežto pro výpočet šířky z vybroušených vzorků je naměřeno 16 hodnot z výbrusu, který reprezentuje jednu rovinu v příčném průřezu stěny. I přes tento rozdíl hodnot tloušťek lze jednoznačně vidět nárůst šířky návaru při stavbě tenké stěny oproti jednotlivému návaru.

Pro každou stěnu, které odpovídá jedna kombinace procesních parametrů, byla vypočítána hodnota směrodatné odchylky k její tloušťce. Bylo zjištěno, že s rostoucí vstupní energií do procesu roste hodnota směrodatné odchylky, viz graf 5.11. Rostoucí směrodatná odchylka naznačuje klesající rozměrovou stabilitu tloušťky stěny a tudíž menší rozměrovou stabilitu jednotlivých návarů. Pro nadcházející objemový test byly proto vybrány dvě kombinace procesních parametrů, pro výkon 350 a 375 W, s nejnižší směrodatnou odchylkou. Tyto hodnoty jsou v grafu zakroužkovány. Jejich podrobná specifikace je v tabulce 5.4. Na obrázku 5.12 jsou ukázky vybroušených vzorků stěn pro parametry z tabulky zmíněné výše.

Tab. 5.4 Tabulka se specifikací rozměrů a procesních parametrů vybraných tenkých stěn

Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (mm/s)	Vstupní energie (J/mm ³)	Tenkostěnný test - výbrus		Tenkostěnný test - skenování		Návarový test
			Tloušťka (μm)	Směrodatná odchylka (μm)	Tloušťka (μm)	Směrodatná odchylka (μm)	Šířka návaru (μm)
350	1100	6,36	272	21	285	24	265
350	1200	5,83	252	23	272	21	238
375	1200	6,25	253	23	279	20	257
375	1300	5,77	253	18	265	19	239



Obr. 5.12 Ukázka vybroušených průřezů tenkých stěn. 1 - 350 W, 1100 mm/s; 2 - 350 W, 1200 mm/s; 3 - 375 W, 1200 mm/s; 4 - 375 W, 1300 mm/s

5.5 Objemový test I

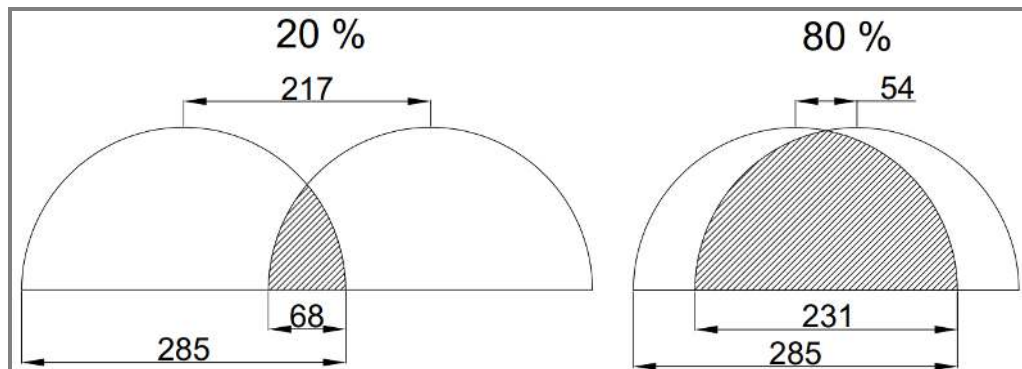
5.5.1 Příprava testu

Cílem objemového testu I je prozkoumat chování nejstabilnějších kombinací procesních parametrů (viz tabulka 5.4) z tenkostěnného testu v objemových vzorcích. K procesním parametrům výkonu a rychlosti skenování laseru byl přidán parametr šrafovací vzdálenosti, který určuje vzdálenost jednotlivých drah laseru. Pro každou kombinaci procesních parametrů byla na základě šířky stěny z tenkostěnného testu vypočítána šrafovací vzdálenost pro jednotlivé procentuální přesahy návarů. Schématické znázornění přesahu drah laseru je na obrázku 5.13 a vzorec pro výpočet přesahu drah je viz 5.1.

Byly navrženy vzorky o rozměrech 5x5x10 mm a nastavena rotace vrstev na 0° viz obr. 5.14. Tímto nastavením docílíme toho, že návary budou v každé vrstvě na stále stejném místě, a bude tak možné sledovat vzájemné spojení návarů, tvorbu mikrostruktury a vzniklou porozitu u různých hodnot přesahu návaru. Pro každou

kombinaci procesních parametrů bude vyrobeno 13 vzorků s hodnotami přesahu drah 20 - 80 %.

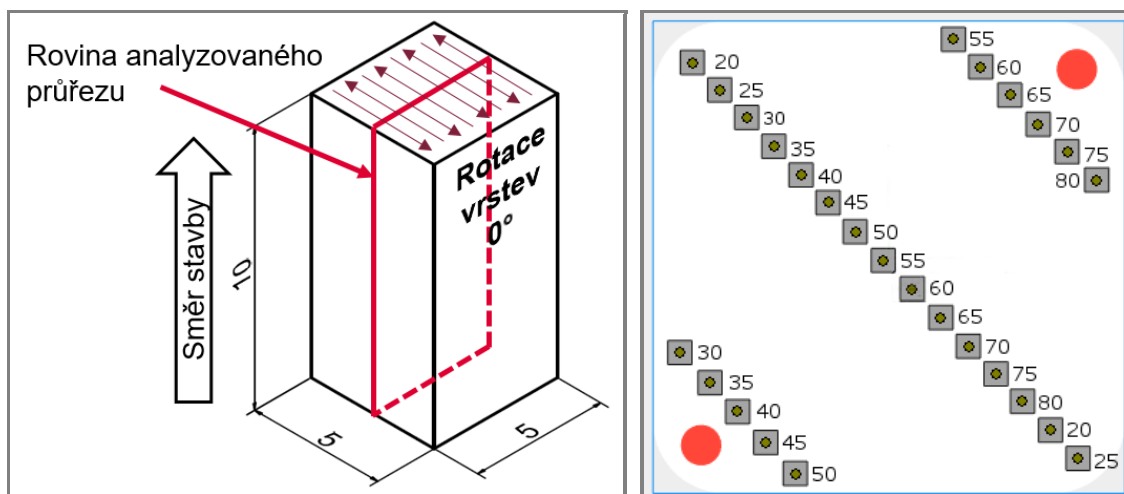
Vzorky budou následně naleptány a bude vyhodnocena šířka vzniklých návarů v objemu a změřena mikrotvrdost pro vybrané vzorky.



Obr. 5.13 Ukázka přesahu návaru o šířce 285 μm při 20% a 80% přesahu. Šrafovací vzdálenost pro tyto přesahy odpovídá hodnotám 217 a 54 μm .

$$S_v = S_n - \frac{p_{p_d} \cdot S_n}{100} \quad (5.1)$$

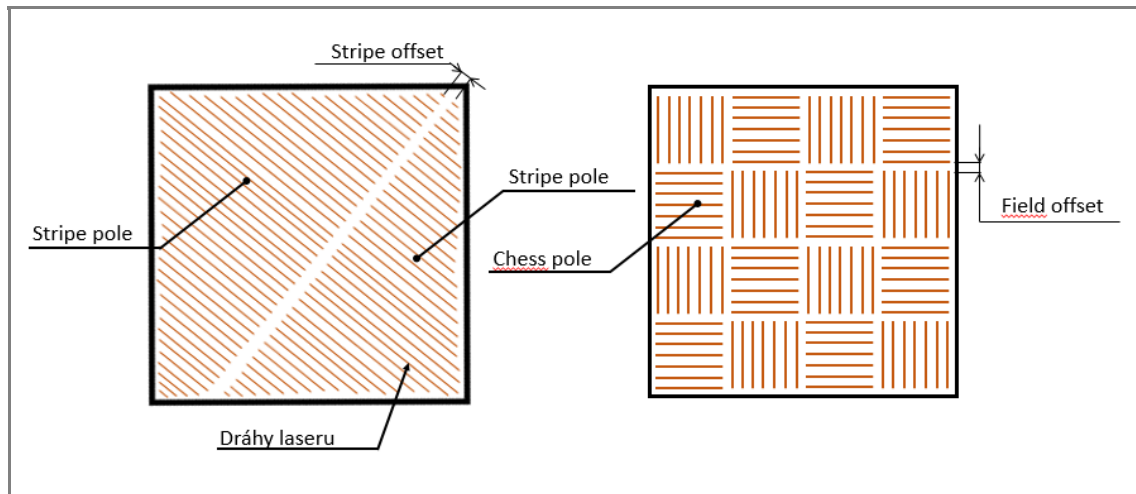
S_v	μm	Šrafovací vzdálenost
S_n	μm	Šířka návaru
p_{p_d}	%	Procentuální přesah drah



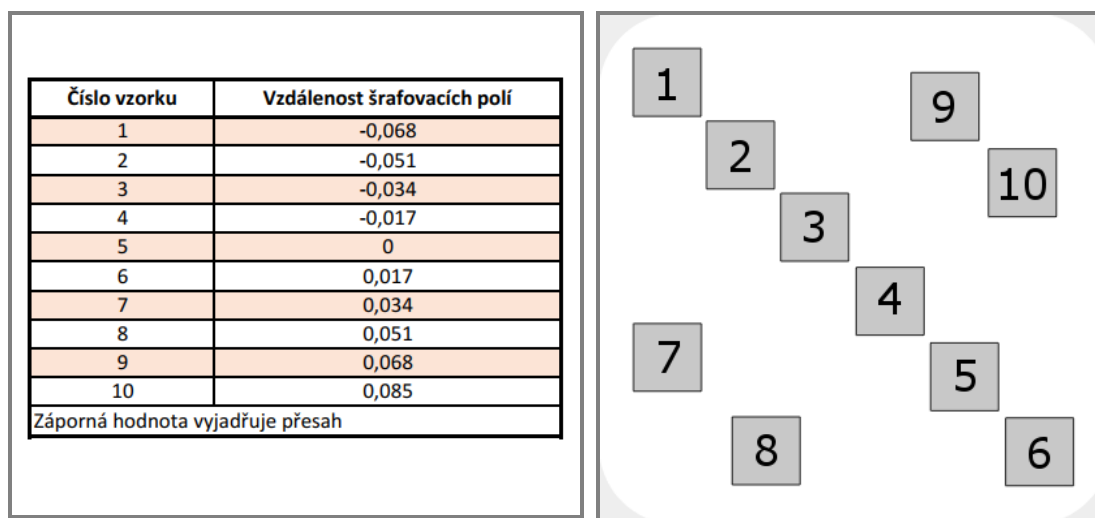
Obr. 5.14 Vlevo: Vzorek pro objemový test I. Na obrázku je znázorněna neměnná orientace drah laseru, směr stavby vzorku a rovina analyzovaného průřezu. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě. Čísla vedle vzorků znázorňují procentuální přesah šrafovacích drah

V rámci objemového testu I proběhl i test pro zvolení vhodné skenovací strategie. V programu Magics pro přípravu dat je možnost použít pro šrafování objemu laserem skenovací strategie "stripe" nebo "chess board". Schéma skenovacích strategií je na obrázku 5.15. Bylo postaveno deset vzorků se strategií "stripe" a deset vzorků se strategií "chess board". Pro každou skenovací strategii byl měněn parametr "stripe

offset" (pro strategii "stripe") a "field offset" (pro strategii "chess board"), který určuje vzdálenost mezi jednotlivými šrafovacími poli. Velikost šrafovacích polí byla nastavena na 5 mm. Rozložení vzorků na platformě a tabulka hodnot jednotlivých přesahů šrafovacích polí je na obrázku 5.16.



Obr. 5.15 Schématická ukázka skenovací strategie "stripe" (vlevo) a skenovací strategie "chess board" (vpravo)

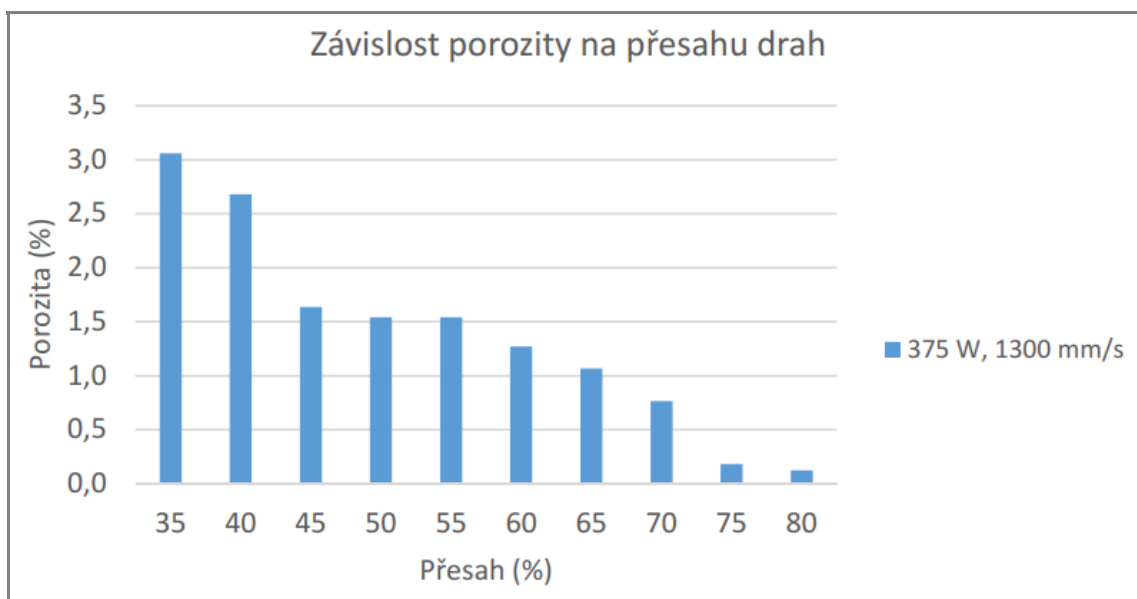


Obr. 5.16 Vlevo: Tabulka s hodnotami vzdáleností šrafovacích polí pro jednotlivé vzorky Vpravo: Rozložení vzorků na platformě pro test strategii. Hodnota uprostřed vzorku označuje jeho pořadové číslo

5.5.2 Výsledky

Z vybroušených příčných řezů vzorků byla analyzována porozita v objemu vzorku. Graf 5.17 zobrazuje závislost procentuální porozity vzorků v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah. Z grafu lze vidět trend klesající porozity vzorků s rostoucím přesahem šrafovacích drah laseru. V grafu není zobrazena porozita pro vzorky s přesahem 20, 25 a 30 %, protože vzorky obsahovaly velké nespojitosti,

pro které nemělo smysl porozitu vyhodnocovat. Obrázek 5.18 zobrazuje vybroušené průřezy jednotlivých vzorků s příslušnou hodnotou jejich přesahu šrafovaných drah.



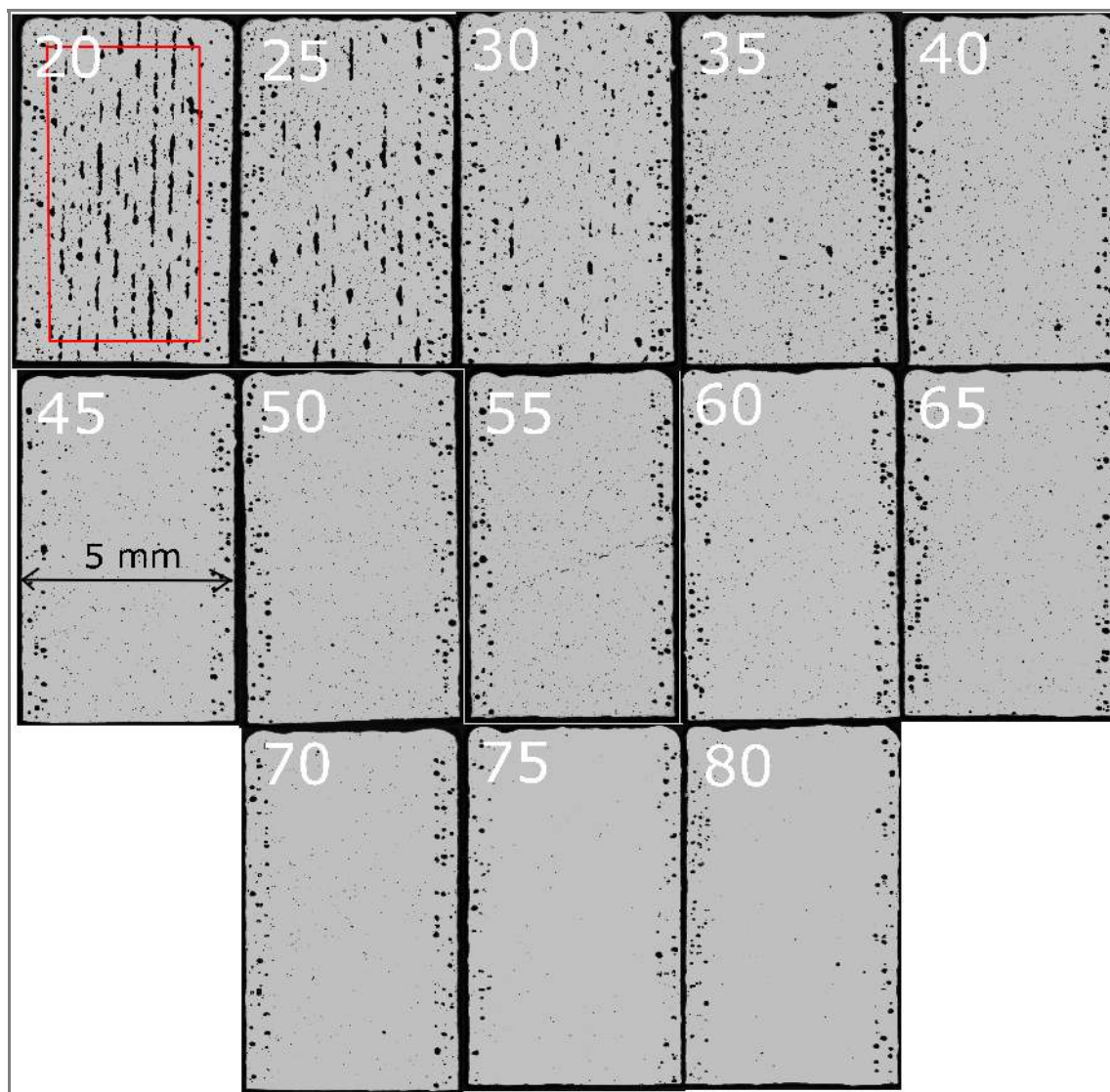
Obr. 5.17 Graf závislosti porozity na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro procesní parametry výkonu laseru 375 W a rychlosti skenování laseru 1300 mm/s

Vybroušené příčné řezy byly naleptány a byla změřena šířka jednotlivých návarů v objemu. Obrázek 5.19 zobrazuje naleptaný vzorek s bližším pohledem na mikrostrukturu, z které bylo měření prováděno. Všechny hodnoty šířek návarů byly pro každý vzorek zprůměrovány a zaneseny do grafu 5.20 zobrazující šířku návaru v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah. Z grafu je zřejmá klesající závislost šířky návarů na rostoucím procentuálním přesahu šrafovacích drah. Graf byl proložen exponenciální spojnici trendu a na základě aproximace hodnot šířek návarů byl určen průměrný procentuální pokles šířky návaru pro danou kombinaci procesních parametrů. Pro výkon 375 W a rychlost laseru 1300 mm/s činí průměrný pokles šířky návaru 3,82 % pro každý vzrůst přesahu šrafovacích drah o 5 %. Pro výkon 375 W a rychlost laseru 1200 mm/s 4,21 %, pro výkon 350 W a rychlost laseru 1200 mm/s 2,37 % a pro výkon 350 W a rychlost laseru 1100 mm/s 3,05 %.

U vybraných vzorků byla naměřena mikrotvrdost. Graf 5.21 zobrazuje hodnotu mikrotvrdosti pro různé hodnoty přesahů šrafovacích drah daných procesními parametry. Lze si všimnout, že nejvyšší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo pro procentuální přesah šrafovacích drah 40 %. Pro vyšší a nižší procentuální přesah tvrdost klesá.

Graf porovnání porozity pro vzorky, na kterých byla testována skenovací strategie je na obrázku 5.22. Lze vidět trend růstu hodnoty porozity s rostoucí vzdáleností šrafovacích polí. Vzorky se strategií "stripe" dosahují nižších hodnot porozity v objemu vzorku oproti vzorkům se strategií "chess board". Vzorky s hodnotami vzdáleností šrafovacích polí -0,068 a 0,017 mm nebyly vyhodnoceny, protože jejich poloha znemožňovala vyfocení vzorku přímo na platformě. Při odřezání vzorků a opětovném přebroušení už ale vzorky nemohly být srovnávány s ostatními, protože byly vybroušeny do jiné hloubky vzorku než vzorky zbylé.

Na obrázku 5.23 je vidět porovnání dvou vzorků s nejmenší objemovou porozitou



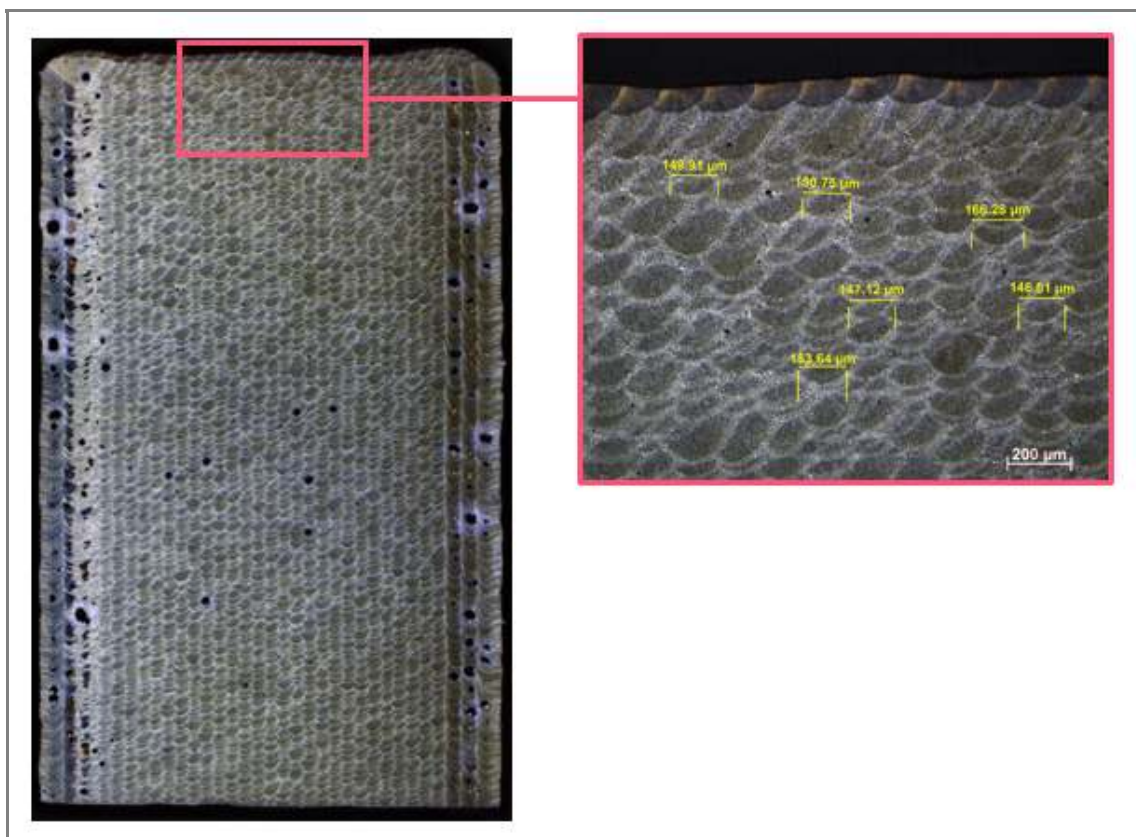
Obr. 5.18 Ukázka vybroušených průřezů vzorků z objemového testu I. Číslo ve vzorku označuje jeho procentuální přesah šrafovacích drah. Červené pole uvnitř prvního vzorku znázorňuje oblast výpočtu objemové porozity vzorků.

šrafovanou strategií "stripe" a "chess board". Oba dva vzorky dosáhly ze své sady nejmenší objemové porozity při přesahu šrafovacích polí -0,051 mm.

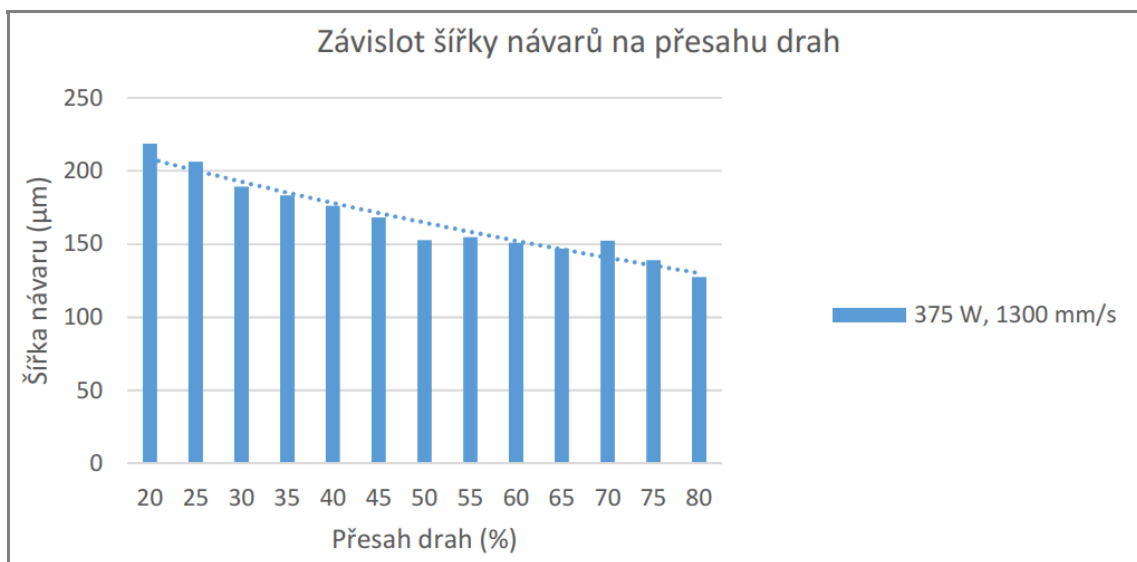
5.5.3 Zhodnocení

Objemový test I sloužil ke zkoumání chování vybraných procesních parametrů z tenkostěnného testu při stavbě objemových dílů. Bylo postaveno celkem 52 vzorků a u každého byl analyzován příčný průřez vzorku, porozita a jeho vzniklá mikrostruktura.

V testu se ukázalo, že s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah (klesající vzdálenost šrafování) klesá porozita v objemu vzorků, viz graf 5.17. Tento trend se potvrdil pro všechny testované procesní parametry. Rozsah procentuálního přesahu šrafovacích drah byl tak velký, že bylo možné pozorovat vzorky s velkými

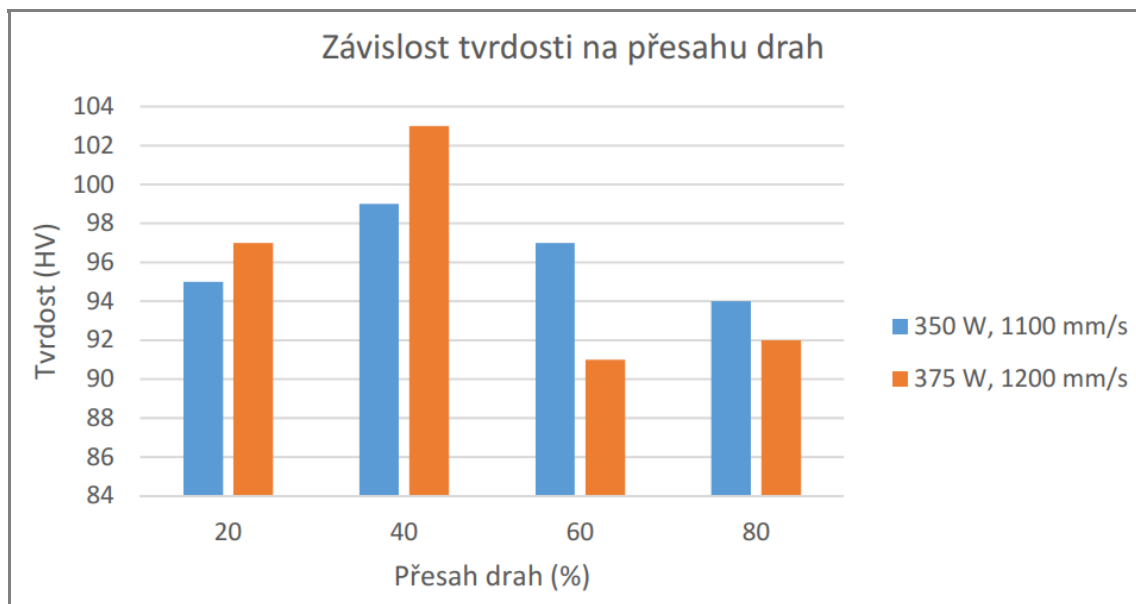


Obr. 5.19 Ukázka naleptaného příčného výbrusu vzorku objemového testu I s detailním pohledem na jednotlivé návary

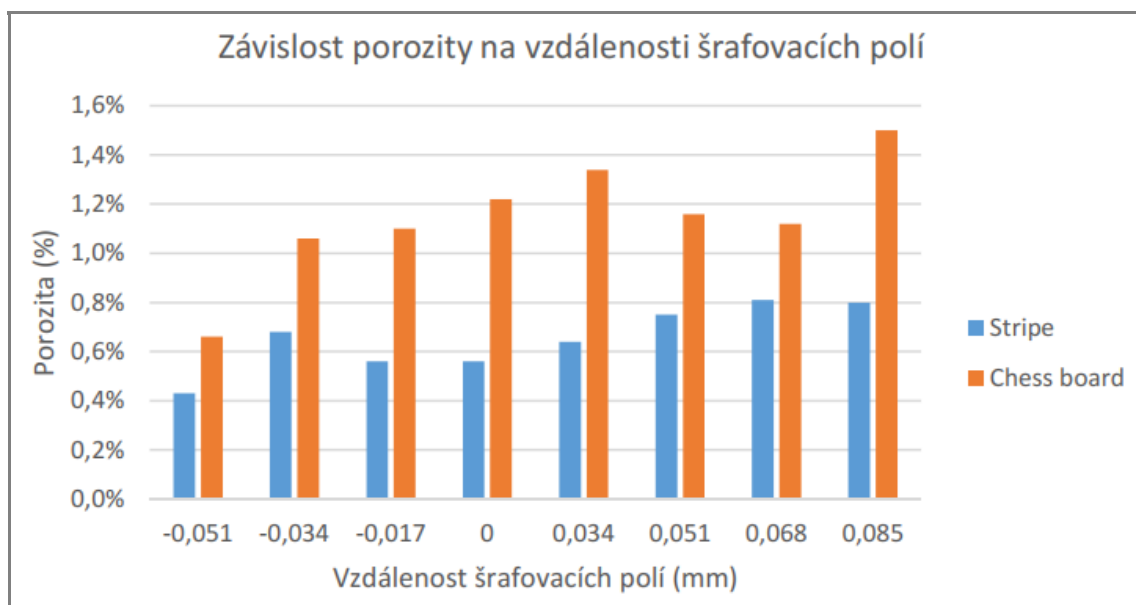


Obr. 5.20 Graf závislosti šířek návarů v objemu vzorku na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro výkon 375 W a rychlost skenování 1300 mm/s.

nespojitosťmi až po vzorky s velmi nízkou porozitou. Důvod poklesu porozity s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah je v dosažení optimální šrafovací vzdálenosti, pro kterou se návary spojují bez vzniku nedokonale spojených míst a v převařování neboli "re-meltování" již vzniklých návarů při vysokých procentuálních



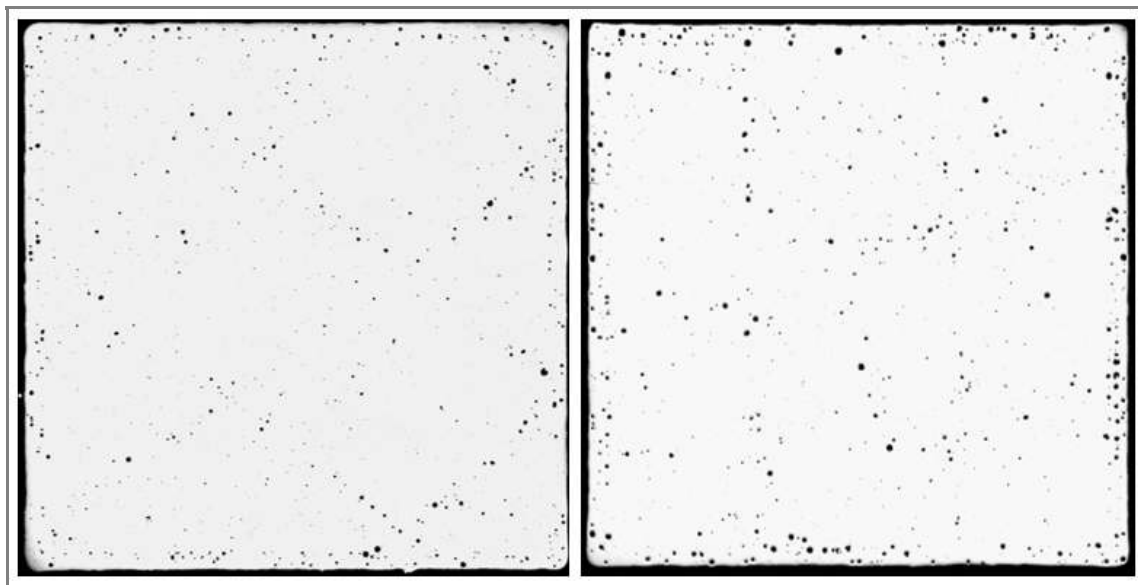
Obr. 5.21 Graf zobrazující hodnoty mikrotvrdosti v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah.



Obr. 5.22 Graf srovnání vzniklé porozity ve vzorku pro strategii šrafování "stripe" a "chess board" v závislosti na vzdálenosti mezi šrafovacími poli

přesazích šrafovacích drah, jak je zmíněno i v pracích [20] a [21]. Důvodem tak velké porozity pro vzorky s přesahy šrafovacích drah 40 - 70 % je pravděpodobně absence rotace vrstev. Kvůli stále stejné poloze jednotlivých drah laseru mohlo dojít k tak velkému zvětšení porozity. Naleptáním a změřením šířky jednotlivých návarů byla vytvořena závislost šířky návarů na procentuálním přesahu šrafovacích drah, viz graf 5.20. S rostoucím přesahem drah klesá šířka jednotlivých návarů ve vzorku. Tato šířka je ale jiná, než šířka z návarového a tenkostěnného testu, protože v objemu se jednotlivé návary navzájem překrývají.

Kvůli velkým vstupním energiím (pro 80% přesah okolo 107 J/mm^3), kterých



Obr. 5.23 Srovnání vzorků výroby strategií "stripe"(vlevo) a strategií "chess board"(vpravo)

se při velkých procentuálních přesazích drah dosahuje, může dojít ke změně mikrostruktury kvůli vícenásobnému tepelnému ovlivnění již vytvořených návarů. Jak popsali Thijs [31], Rao [10] a Aboulkhair [32]- v opakovaně přetavených oblastech, které se nazývají tepelně ovlivněná oblast (místa přesahu jednotlivých návarů), dochází k hrubnutí zrna, precipitaci křemíku a tím k rozpadu jemnozrnné struktury. Vzhledem k tomu, že při zvyšujícím se procentu přesahu šrafovacích drah mají tyto tepelně ovlivněné oblasti větší rozměr, byla pro různé přesahy drah změřena tvrdost. Hodnoty tvrdosti pro různé procentuální přesahy drah a použité procesní parametry jsou v grafu 5.21. Největší hodnoty tvrdosti se dosáhlo při procentuálním přesahu drah 40 %. S rostoucím přesahem tvrdost klesá. Pro přesah 20 % je tvrdost nižší než pro 40 %, ale skoro stejná nebo vyšší než pro 60 a 80% přesah. Lze říci, že s rostoucím přesahem drah od určité optimální hodnoty tvrdost klesá z důvodu nadměrného množství tepelně ovlivněných oblastí, které vznikají opakovaným přetavováním již vzniklých návarů.

Z grafu 5.22 je vidět vliv skenovací strategie "stripe" na výslednou porozitu vzorku. Ve všech případech dosáhly vzorky skenované strategií "stripe" nižších hodnot objemové porozity než u vzorků skenované strategií "chess board". To je způsobeno počtem spojení šrafovacích polí. Strategie "chess board" jich má při skenování jedné vrstvy mnohem víc než strategie "stripe". Právě tato spojení jsou kritická místa, kde se objevuje porozita, jak jde vidět na výbrusech na obrázku 5.23. Porozita je nejvíce situována v úsečkách, které jsou místy spojení jednotlivých šrafovacích polí. Proto byla v rámci testu měněna vzdálenost šrafovacích polí, aby bylo dosaženo co nejoptimálnější vzdálenosti za co nejmenšího vzniku porozity. Pro obě dvě strategie to byla vzdálenost -0,051 mm. Záporná hodnota vzdálenosti označuje přesah. Díky přesahu jednotlivých drah je tak eliminován vznik porozity způsobené nedostatečným spojením roztaveného materiálu při styku šrafovacích polí.

5.6 Objemový test II

5.6.1 Příprava testů

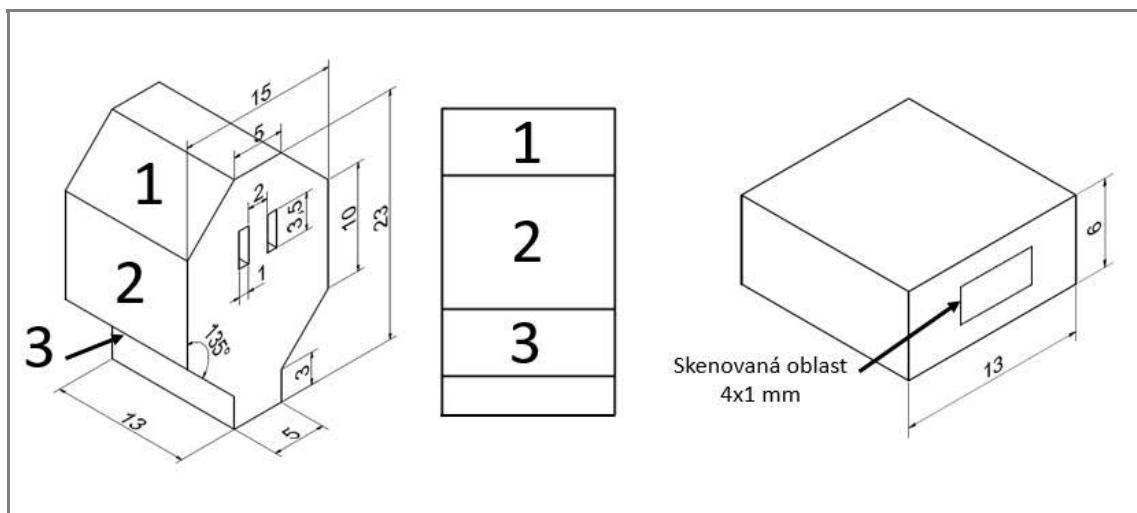
Objemový test II se zabývá finálním ověřením vzniklé porozity objemových vzorků. Z předchozího objemového testu I vyplynulo, že se nemá smysl zabývat vzorky s menším procentuálním přesahem drah než 40 %, kvůli jejich zjevným nespojitostem mezi jednotlivými drahami laseru. V objemovém test II budou proto vyrobeny vzorky s přesahem šrafovacích drah 40, 50, 60, 70 a 80 % pro stejné procesní parametry použité v objemovém testu I. Bude také přidána rotace mezi jednotlivými vrstvami o 67° a přes celý vzorek bude jedno šrafovací pole, aby byl eliminován vznik pórů mezi spojeními jednotlivých polí. Bude použita skenovací strategie "stripe".

Byly navrženy objemové vzorky o rozměrech 13x13x6 mm, které lépe simulují stavbu reálných objemových dílů. Rozložení vzorků na platformě bude pro co největší porovnatelnost uprostřed platformy, protože s rozdílnou polohou dílu na platformě může docházet k nepatrným rozdílům mezi vzorky. To lze nejvíce pozorovat pro vzorky, které jsou na okraji platformy. I když jsou tyto odchylky minimální, pro maximální průkaznost výsledků budou vzorky situovány uprostřed platformy. Každý vzorek s unikátními procesními parametry bude postaven 2x pokaždé v jiné poloze na platformě, aby mohlo být porovnáno, jaký vliv má poloha dílu na výslednou porozitu. Rozložení vzorků lze vidět na obrázku 5.25 vpravo. Číslo uprostřed vzorků znázorňuje procentuální přesah šrafovacích drah. Na obrázku 5.25 vlevo je zobrazen objemový vzorek se znázorněním směru stavby a analyzované roviny. Na vzorcích bude vyhodnocena objemová porozita a tvrdost. S nejlepšími parametry budou následně postaveny tahové vzorky.

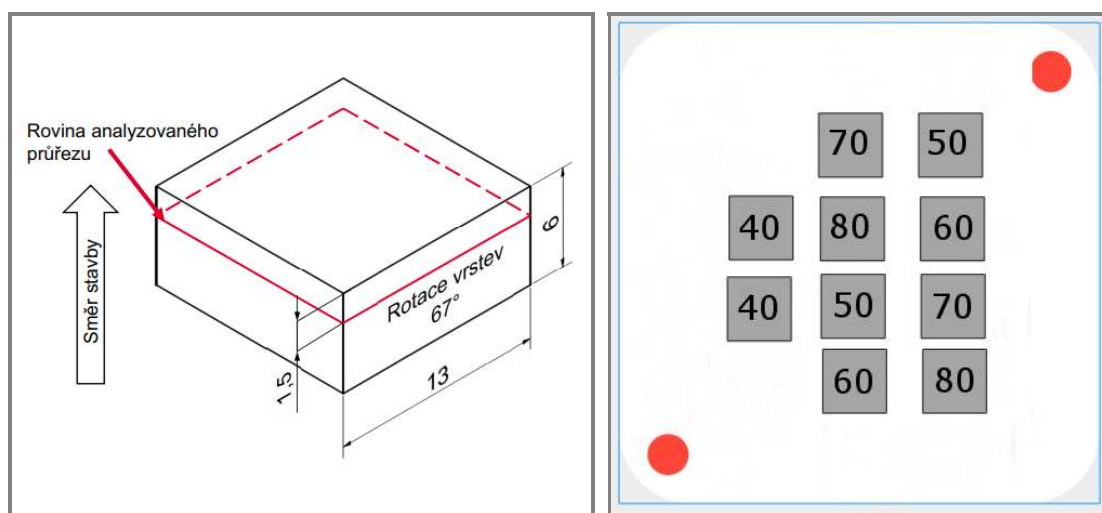
V rámci objemového testu II byly postaveny vzorky pro zhodnocení drsnosti povrchu v závislosti na procesních parametrech kontury. Byly navrženy vzorky pro hodnocení drsnosti svislého povrchu, ale i povrchu zkoseného pod úhlem 45° a 135°. Ukázka vzorků je na obrázku 5.24. Rozsah parametrů byl zvolen pro výkon od 300 do 325 W a pro rychlost skenování od 1100 do 1300 mm/s. Byla sledována i závislost vlivu povrchové drsnosti na vstupní energii při šrafování objemu. Pro skenování kontury byly použity dvě dráhy laseru, pouze pro jednu sadu vzorků byla použita jedna.

5.6.2 Výsledky

Graf 5.26 zobrazuje srovnání hodnot porozity pro jednotlivé procesní parametry v závislosti na přesahu šrafovacích drah. Lze vidět, že hodnoty porozit pro parametry výkonu 350 W a rychlosti laseru 1100 mm/s dosahují až dvojnásobně větších hodnot porozity než ostatní vzorky. Je velmi nepravděpodobné, že by to bylo způsobeno procesními parametry, které jsou velmi podobné těm, u kterých hodnoty porozity vyšly výrazně menší. Stavba s těmito parametry proběhla jako první a nejpravděpodobnějším faktorem vzniku tak vysoké porozity je, že prášek byl nedostatečně vysušený. U ostatních vzorků lze pozorovat klesající tendenci hodnot porozity vůči přesahu šrafovacích drah. Ukázka jednotlivých vzorků je na obrázku 5.27. Nejmenší porozity 0,084 % bylo dosaženo u vzorku vyrobeného s procesními parametry výkonu laseru



Obr. 5.24 Vlevo: Vzorek se zkosenými hranami pro hodnocení svislého a zkoseného povrchu. Vpravo: Vzorek pro hodnocení svislého povrchu

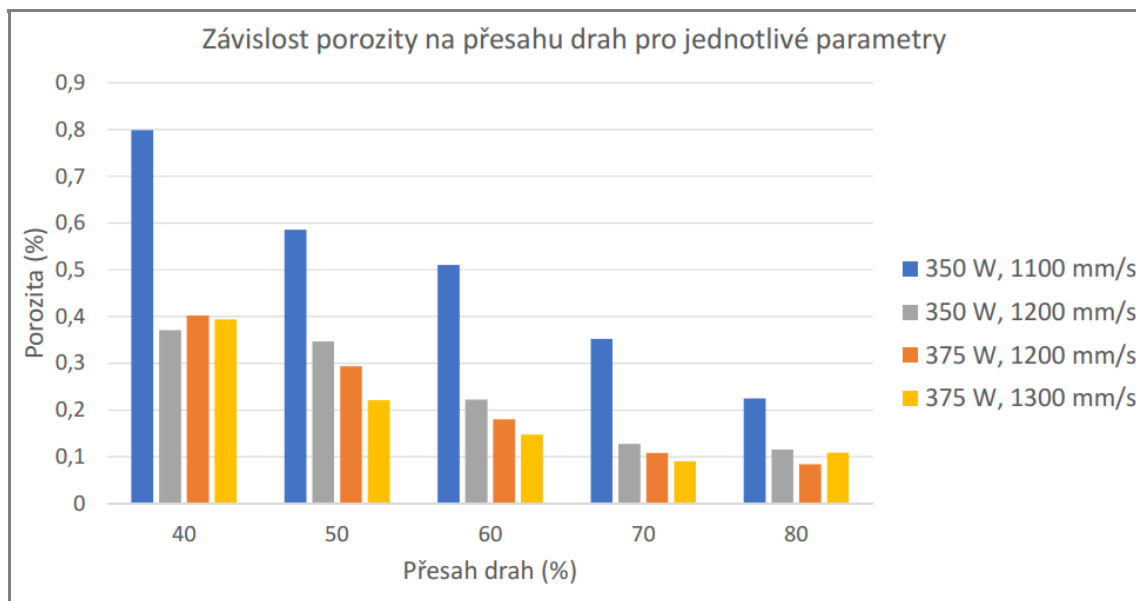


Obr. 5.25 Vpravo: Rozložení vzorků na platformě pro objemový test II. Vlevo: Vzorek pro objemový test II. Na obrázku jsou znázorněny jeho rozměry, rovina analyzovaného řezu a směr stavby

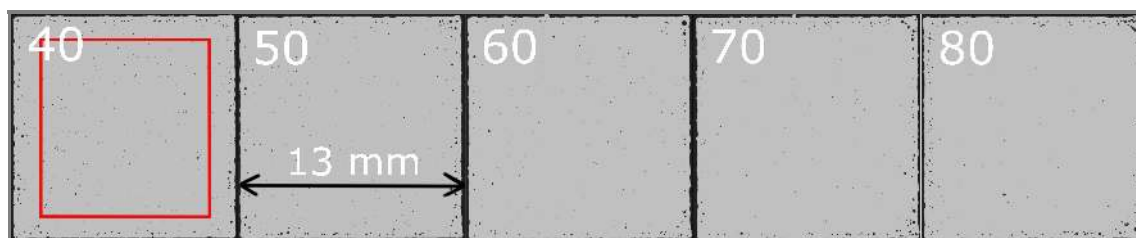
375 W, rychlosti laseru 1200 mm/s a procentuálním přesahem šrafovacích drah 80 %.

Graf zobrazující hodnoty porozity pro výkon 375 W a rychlost laseru 1200 mm/s je vlevo na obrázku číslo 5.28. Lze si všimnout jednoznačně klesajících hodnot porozity s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah. Z grafu je možné porovnat vliv umístění vzorku na platformě na jeho výslednou porozitu. Modré sloupce znázorňující porozitu odpovídají vzorkům s modrou tečkou na obrázku vpravo a oranžové sloupce odpovídají vzorkům s oranžovou tečkou. Jednotlivé hodnoty porozity pro vzorky na okraji jsou srovnatelné s hodnotami porozity vzorků uprostřed a naopak.

Byla provedena rozměrová analýza pórů vyskytující se v objemu jednotlivých vzorků. Graf 5.29 ukazuje počet pórů v jednotlivých vzorcích. S rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah lze vidět klesající tendenci počtu pórů. Analýza



Obr. 5.26 Graf zobrazující srovnání hodnot porozity pro jednotlivé procesní parametry v závislosti na hodnotě procentuálního přesahu šrafovacích drah



Obr. 5.27 Ukázky vybroušených vzorků. Číslo ve vzorku zobrazuje procentuální přesah šrafovacích drah vzorku. Červené ohraničení v prvním vzorku zleva zobrazuje oblast, z které byla vyhodnocována porozita.

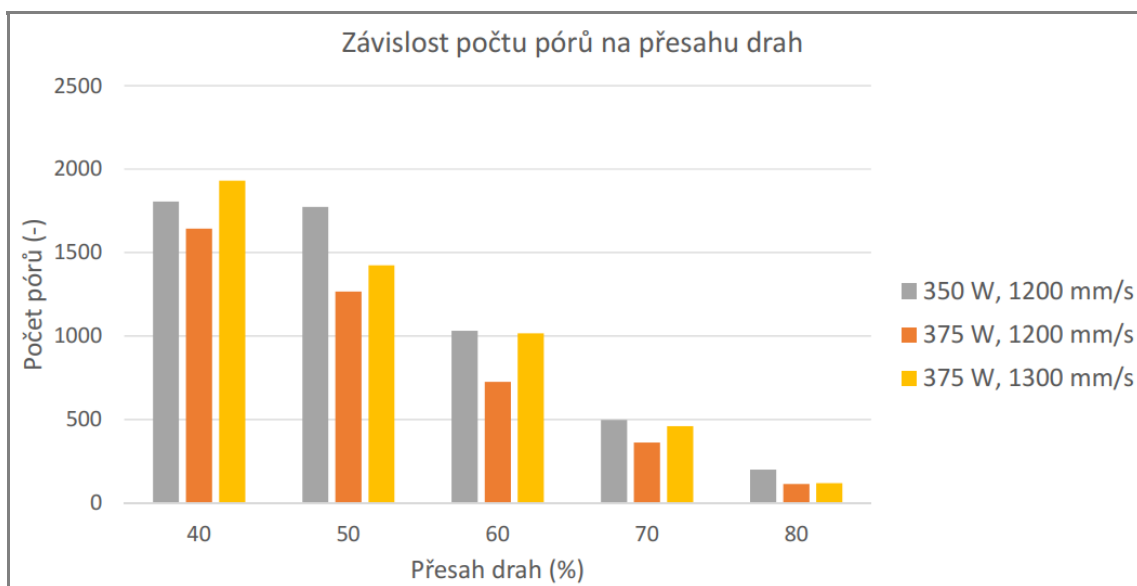
nebyla provedena pro vzorky vyrobené s procesními parametry výkonu laseru 350 W a rychlosti 1100 mm/s.

Byla provedena analýza rozměrové distribuce pórů pro vzorky vyrobené procesními parametry výkonu 375 W a 1200 mm/s rychlosti laseru. Na obrázku 7.9 v příloze jsou zobrazeny grafy znázorňující procentuální plošné zastoupení jednotlivých velikostí pórů v objemu vzorku. Z grafů lze vypožorovat postupnou změnu rozměrové distribuce pórů s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah. Vzorky s přesahem drah 40 a 50 % mají ve svém objemu dominantně zastoupeny póry o velikosti 10 - 40 μm . U vzorku s přesahem drah 60 % se tato oblast zúžila na rozsah velikosti pórů 10 - 30 μm . U vzorků s přesahem drah 70 a 80 % se dominantní oblastí tvořící velkou část celkové porozity stávají póry o rozměrech 100 - 130 μm , pro přesah 70 %, a 100 - 140 μm pro přesah 80 %. Oblast pórů s velikostí 5 - 40 μm se stává minoritní. Lze říci, že s rostoucím přesahem šrafovacích drah se zmenšuje podíl pórů o rozměru 5 - 40 μm na celkovou porozitu. Naopak podíl pórů o rozměru 100 - 140 μm má na celkovou porozitu s rostoucím přesahem drah výraznější vliv.

Graf 5.30 zobrazuje vývoj počtu pórů v jednotlivých velikostech pro různé hodnoty procentuálního přesahu šrafovacích drah. Lze si všimnout klesající tendence pro každou velikost s rostoucím procentuálním přesahem drah. Tato tendence pokračuje



Obr. 5.28 Vlevo: Graf závislosti porozity na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro procesní parametry 375 W, 1200 mm/s. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě

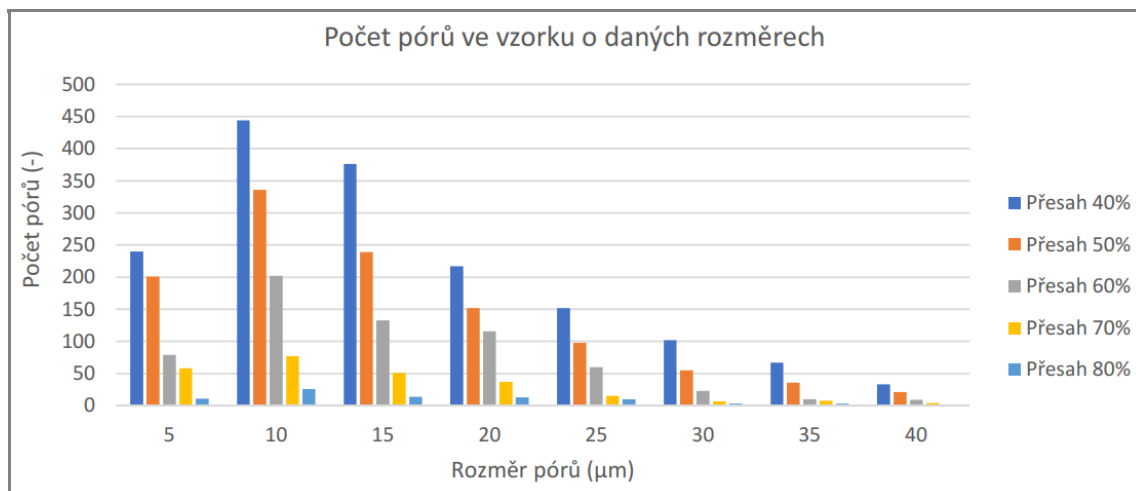


Obr. 5.29 Graf zobrazující počet pórů pro jednotlivé procesní parametry v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah

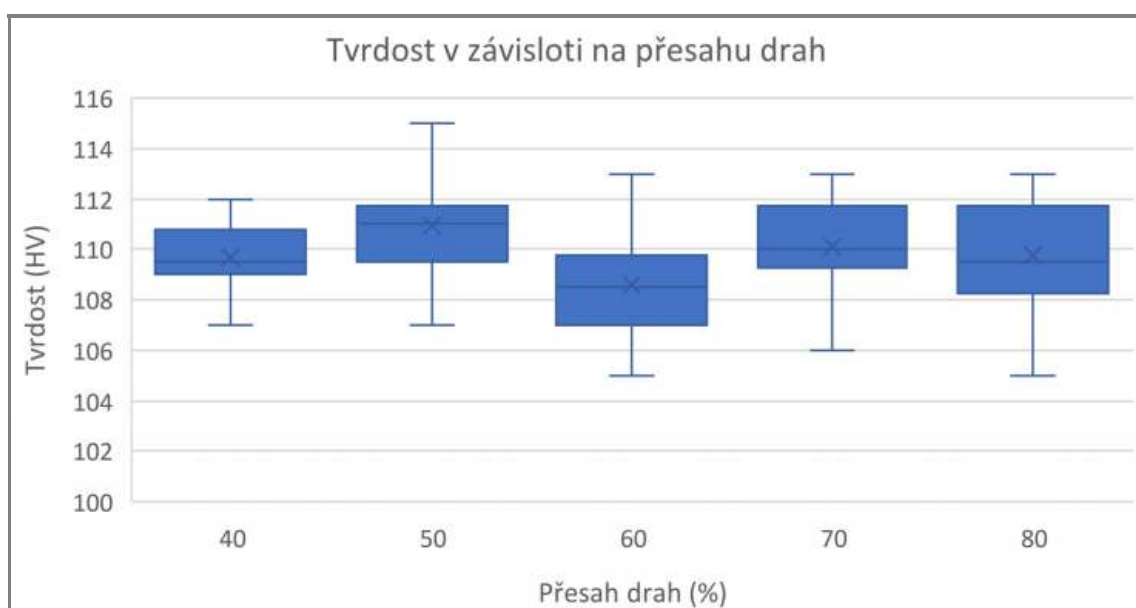
až do velikosti pórů 90 μm . Výskyt pórů nad tuto velikost je ve vzorcích náhodný, ale lze pozorovat postupné zvětšování se maximální velikosti pórů až do velikosti 140 μm s rostoucím přesahem drah.

Pro vzorky vyrobené s parametry výkonu 375 W a rychlosti laseru 1200 mm/s byla změřena mikrotvrdoost, stejně jako v objemovém testu I 5.21. Graf závislosti tvrdosti vzorků na přesahu šrafovacích drah je na obrázku 5.31.

V grafu 5.32 lze vidět závislost drsnosti svislého povrchu na použitých procesních parametrech kontury pro jednotlivé procesní parametry objemu. Číslo nad každým sloupcem hodnoty drsnosti znázorňuje energii vnesenou do objemu vzorku. Hodnoty drsnosti pro různé parametry kontury dosahují podobných hodnot až na vzorky, u kterých byla nastavena pouze jedna dráha pro konturu. Při použití pouze jedné dráhy laseru pro konturu vzrostla drsnost povrchu v průměru o 50 % oproti použití

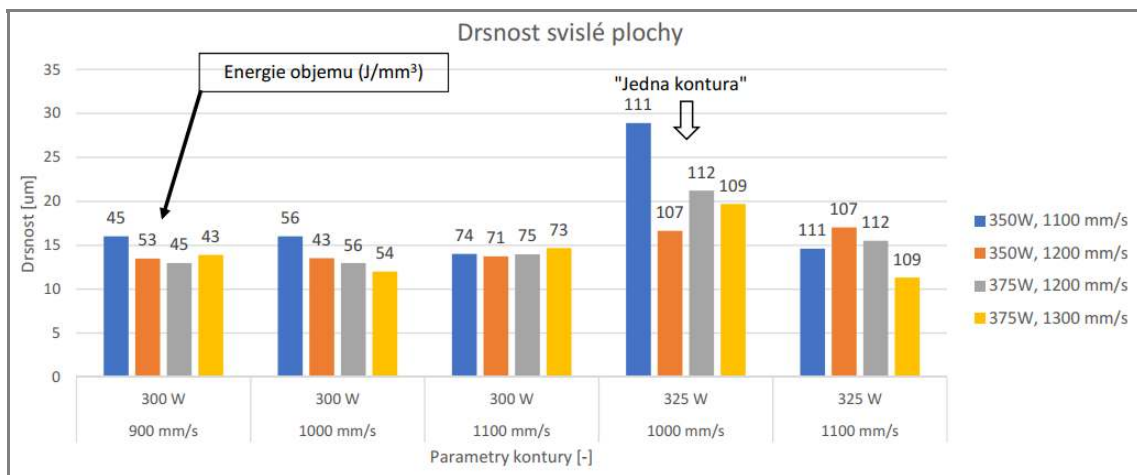


Obr. 5.30 Graf počtu pórů v jednotlivých velikostech pro různé procentuální přesahy šrafovacích drah

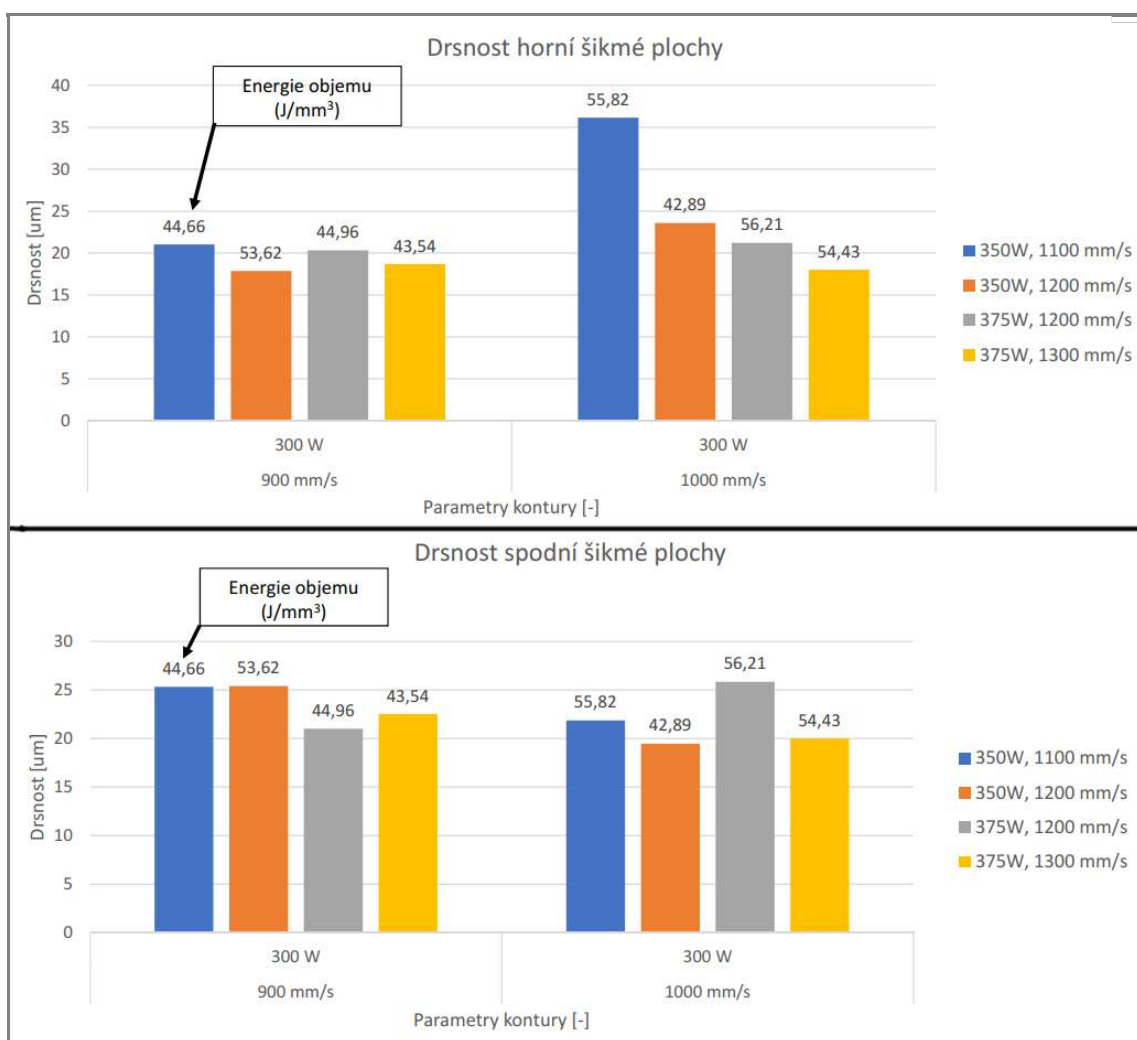


Obr. 5.31 Krabicový graf zobrazující střední, maximální a minimální hodnoty naměřené tvrdosti v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro vzorky vyrobené procesními parametry výkonu laseru 350 W a 1200 mm/s rychlosti laseru.

dvou drah. Grafy 5.33 zobrazují závislost drsnosti šikmého povrchu na použitých procesních parametrech kontury pro jednotlivé procesní parametry objemu. Číslo nad každým sloupcem hodnoty drsnosti znázorňuje energii vnesenou do objemu vzorku. Drsnost povrchu pro šikmé plochy je větší z důvodu schodovitého efektu, který je typický pro aditivní technologie. Ukázalo se, že drsnost povrchu pro horní šikmou plochu je průměrně o 40 % větší než pro svislou plochu a drsnost pro spodní šikmou plochu je o 20 % vyšší než pro horní plochu.



Obr. 5.32 Graf zobrazující drsnost svislého povrchu pro jednotlivé procesní parametry kontury. Čísla nad sloupci udávají objemovou energii, s kterou byl skenován objem vzorku.



Obr. 5.33 Grafy zobrazující drsnost šikmých povrchů pro jednotlivé procesní parametry kontury. Čísla nad sloupci udávají objemovou energii, s kterou byl skenován objem vzorku.

5.6.3 Zhodnocení

Cílem objemového testu II bylo ověřit získané výsledky porozity a tvrdosti vzorků z objemového testu I. Byly navrženy větší testovací vzorky a přidána rotace jednotlivých vrstev, aby byl nasimulován proces výroby vzorků jako při reálné výrobě objemového dílu. Výsledky vzniklé porozity v objemu vzorků v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah potvrdil předpoklad, který byl zjevný už z objemového testu I, a to že s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah klesá výsledná porozita v objemu vzorku. Toto tvrzení potvrzuje graf 5.26, který srovnává hodnoty porozity pro všechny vzorky. Vzorky s parametry 350 W, a 1100 mm/s skenovací rychlosti laseru jsou jako jediné odchýleny od hodnot porozity ostatních vzorků. Trend poklesu porozity je ale stejný jak pro ostatní vzorky s jinými procesními parametry. Nejpravděpodobnějším vznikem této odchylky je nedostatečně vysušený prášek, protože to je jediná proměnná, kterou se stavba těchto vzorků lišila od ostatních. Prášek byl pro tuto první stavbu sušen 3 hodiny, kdežto pro ostatní stavby s odlišnými procesními parametry to bylo více než 24 hodin.

V dalším grafu viz obr. 5.28 je zobrazen průběh hodnot porozity pro vzorky vyrobené procesními parametry výkonu laseru 375 W a skenovací rychlosti 1200 mm/s. Porovnáním hodnot porozity z grafu vlevo s umístěním vzorků na platformě z obrázku vpravo se zjistilo, že poloha vzorku uprostřed nebo na okraji nemá vliv na výslednou hodnotu porozity. Příkladem může být vzorek s procentuálním přesahem šrafovacích drah 50 %, který má na okraji menší hodnotu porozity než uprostřed. Toto pravidlo se potvrdilo i u vzorků s jinými procesními parametry. Výraznější vliv má ale na hodnotu porozity vzorku jeho umístění na platformě vůči pravému okraji. Inertní atmosféra proudí ve směru zprava doleva. Při tavení jednotlivých vrstev dochází k odvodu spalin a spálených částic po směru proudění inertní atmosféry a určitá část těchto částic spadne na již vyrobené vrstvy vzorků, protože směr stavby jednotlivých vzorků je zleva doprava. Tento rozdíl v hodnotách porozity je v průměru okolo 5 % a jak lze vidět z grafu 5.28 vlevo není vždycky platný. Nicméně určitý vliv na výslednou porozitu vzorků je připsán této skutečnosti.

Z analýzy počtu pórů, která je zobrazena v grafu 5.29 jde vidět, že nejmenšího počtu pórů dosahují ve všech případech vzorky vyrobené s procesními parametry výkonu 375 W a rychlosti skenování 1200 mm/s. Pro tyto procesní parametry byla provedena detailnější analýza rozměrové distribuce pórů, která je na obrázku 7.9 v příloze. S přibývajícím procentuálním přesahem drah je ve vzorku eliminován procentuální vliv pórů o velikosti okolo 5 - 40 μm na výslednou porozitu. S tímto poklesem narůstá procentuální vliv pórů o velikosti 100 - 145 μm na celkovou porozitu, která se v každém vzorku alespoň jednou vyskytuje. Jak ukazuje graf 5.30, s rostoucím procentuálním přesahem drah klesá počet pórů o velikostech 5 - 40 μm . Tento klesající trend pokračuje až do velikosti pórů 90 μm . Pro detailnější popis rozložení a rozměrové distribuce pórů by bylo nutné udělat μCT sken, který je schopen analyzovat velikost a rozložení pórů v celém objemu vzorku. Vyhodnocená rozměrová distribuce pórů je na základě pouze jednoho řezu a nereflkuje tak plně celý objem vzorku.

Tvrdot jednotlivých vzorků pro procesní parametry 350 W výkon laseru a 1200 mm/s rychlost laseru popisuje graf 5.31. Z grafu nevyplývá žádná výrazná závislost tvrdosti jako tomu bylo u grafu tvrdosti objemového testu I 5.21. Předpokládalo se,

že největší tvrdosti bude dosahovat vzorek s přesahem šrafovacích drah 40 % a s přibývajícím hodnotou přesahu šrafovacích drah bude tvrdost klesat. Největší průměrné hodnoty tvrdosti dosáhly vzorky s přesahem drah 50 % tj. 110,9 HV a nejmenší hodnoty dosáhly vzorky s přesahem drah 60 % tj. 108,6 HV. To je rozdíl o 2,3 HV, která je v mezi odchylek této měřicí metody. Proto se dá říct, že tvrdost všech vzorků je stejná. Z přepočtení tabulky tvrdosti na mez pevnosti materiálu je odhad, že materiál má pevnost v tahu okolo 350 MPa.

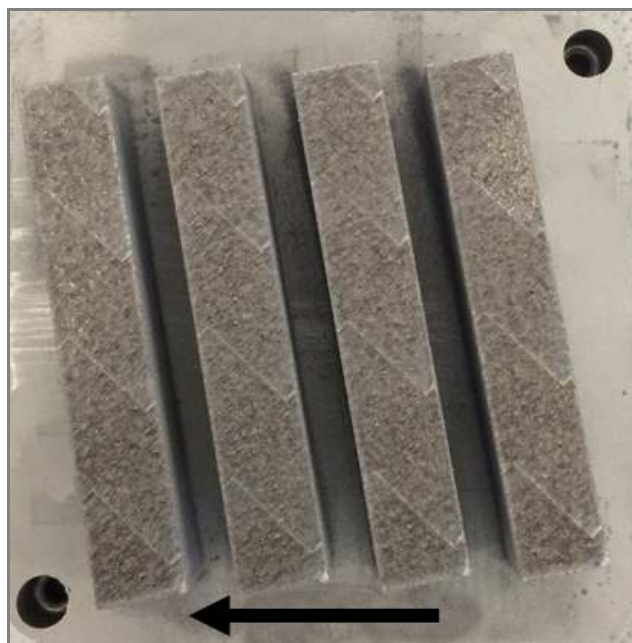
Drsnost povrchu vyrobených vzorků byla měřena na svislých a šikmých plochách. Ukázalo se, že s měnícími se procesními parametry kontury (v testovaném rozmezí) nedochází k žádné výrazné změně drsnosti povrchu a to ani při rozdílných hodnotách energie vstupující do vzorku při šrafování objemu, viz obr.5.32. Výraznější vliv na drsnost povrchu má počet použitých drah pro konturu.

5.7 Testování mechanických vlastností

5.7.1 Příprava testu

V rámci testu byly vyrobeny biletý o rozměrech 13x13x75 mm, z nichž byly obrobena vzorky pro tahovou zkoušku. Byly vybrány procesní parametry o výkonu laseru 375 W, 1200 mm/s rychlosti laseru a procentuálním přesahem šrafovacích drah 80 % z objemového testu II. Zvolené procesní parametry dosáhly nejmenší hodnoty porozity 0,083 % a obsahovaly nejméně pórů ze všech vyrobených vzorků.

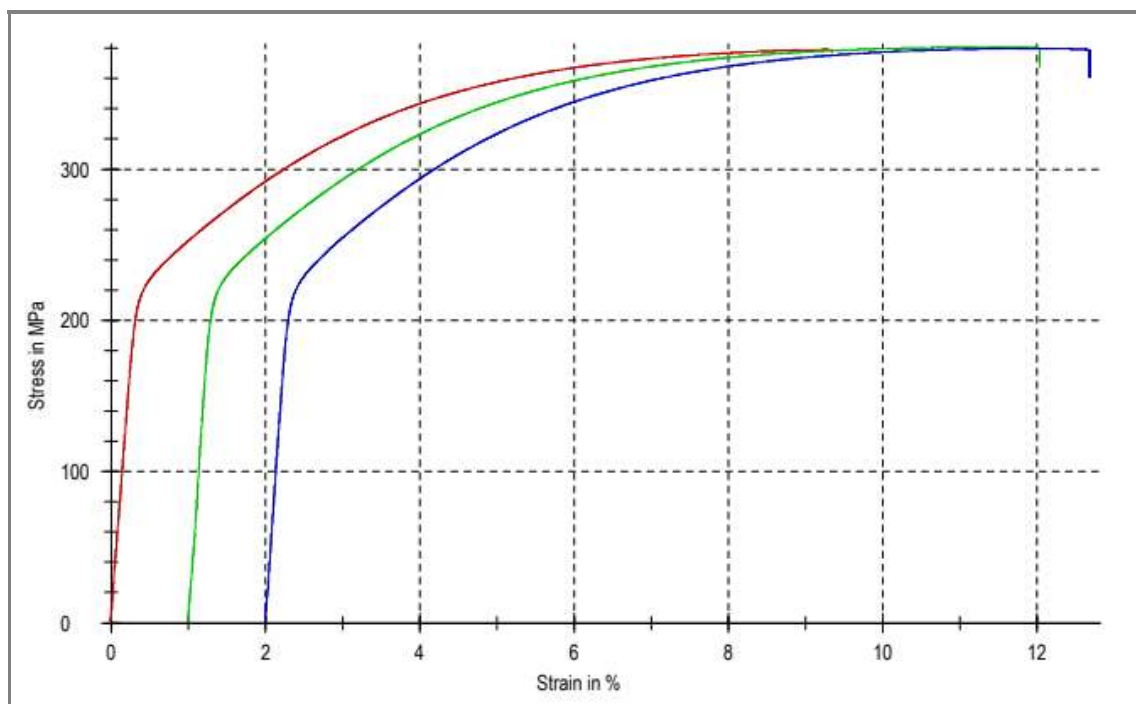
Rozložení bilet na platformě bylo nejdelším rozměrem vzorku kolmo na směr proudění atmosféry viz obr. 5.34. Natočení vzorků na platformě je z důvodu, aby břit nanášecího zařízení vstupoval na vzorek postupně a nepěchoval tak prášek před objemem biletý, čímž by mohla být narušena rovnoměrnost nanášené vrstvy.



Obr. 5.34 Obrázek platformy s vytisklými tahovými vzorky. Šipka zobrazuje směr proudění atmosféry

5.7.2 Výsledky a zhodnocení

Graf s výsledky takové zkoušky je na obr. 5.35. Z grafu lze vidět průběh tahové zkoušky v závislosti napětí na poměrném prodloužení. Dosažená mez pevnosti je statisticky stanovena na 380 MPa. V porovnání s mezí pevnosti predikovanou z naměřené tvrdosti, která byla 350 MPa, je tato hodnota o 30 MPa vyšší. Mez kluzu vzorků je 230 MPa a poměrné prodloužení 10 %. V tabulce 5.5 jsou zobrazeny podrobné výsledky tahové zkoušky.



Obr. 5.35 Graf zobrazující průběh tahové zkoušky

Tab. 5.5 Tabulka s výsledky tahové zkoušky

Legend	Specimen ID	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	F _m N	R _m MPa	R _B MPa	A _g %	A %	Z %
■	FZ1_TSE_TD02 (02)	7,980	40,04	65,6	230	18960	379	378	8,7	8,8	8,7
■	FZ1_TSE_TD02 (03)	7,970	40,03	80,5	229	18993	381	368	10,0	10,6	10,1
■	FZ1_TSE_TD02 (04)	7,980	40,03	76,2	229	18996	380	361	9,4	10,2	10,7

V porovnání s hodnotami odlévaného materiálu, viz tabulka 5.1, je hodnota meze pevnosti o 200 MPa vyšší, hodnota meze kluzu až o 145 Mpa vyšší a poměrné prodloužení až o 4,9 % pro porovnání se vzorkem bez tepelného zpracování. Při porovnání se vzorky s tepelným zpracováním T6 je mez pevnosti vyšší o 23 MPa, mez kluzu nižší až o 75 MPa a poměrné prodloužení až o 3,9 %.

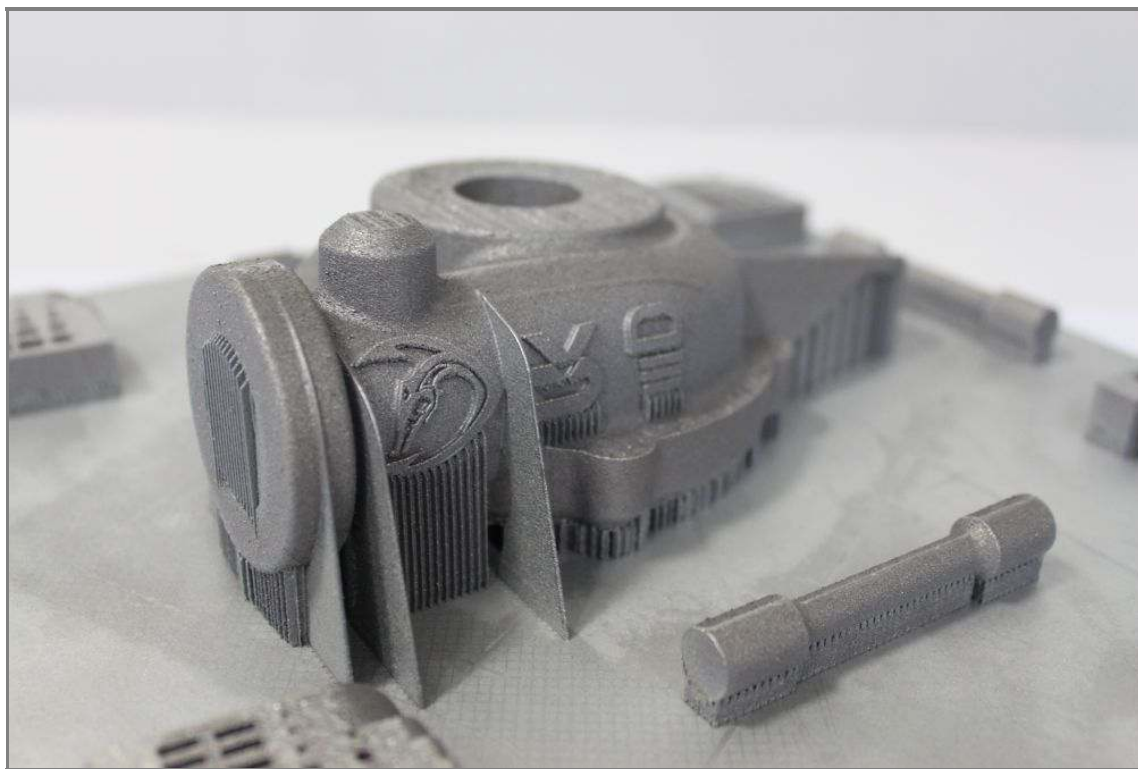
Dosažená mez pevnosti je srovnatelná se slitinou AlSi12, kterou zkoumal Prashant [27]. V porovnání se slitinou AlSi10Mg, kterou zkoumal Read [35] je dosažená mez pevnosti vyšší o 45 Mpa, mez kluzu nižší o 20 MPa a poměrné prodloužení vyšší o skoro 9 %. V práci [5] Kimura zkoumal slitinu AlSi7Mg0,3 a dosáhl meze pevnosti o 20 MPa vyšší, meze kluzu o 30 MPa menší a poměrného prodloužení o 3 % vyšší.

Rao [10] zkoumal mechanické vlastnosti stejné slitiny jako je o ní pojednáváno v této práci a mez pevnosti jeho materiálu byla o 46 MPa vyšší, mez kluzu o 50 MPa vyšší a poměrné prodloužení vyšlo srovnatelně 10 %.

Z porovnání mechanických vlastností vzorků lze usoudit, že slitina AlSi7Mg0,6 patří k nadprůměrným v oblasti mechanických vlastností slitin. Při porovnání mechanických vlastností konkuruje slitinám zmíněným v ostatních pracích [5,55].

5.8 Výroba prototypu

Pro ověření navrhnutých procesních parametrů byl postaven prototyp dílu z analyzované slitiny AlSi7Mg0,6. Pro tisk byl vybrán "housing" turbodmychadla, který byl navrhnut speciálně pro tým Formule student z VUT a splňuje požadavky komplexního dílu s různými tvarovými prvky od tenkých stěn, převisů až po objem tělesa. Na obrázku 5.36 je vytisknuté turbodmychadlo společně s tahovými vzorky pro ověření mechanických vlastností dílu a speciálními tvarovými díly pro ověření rozměrové přesnosti dílů s tímto tiskovým nastavením. Doba tisku této stavby trvala 34 hodin. Z prvotní analýzy vytisknuté součásti lze pozorovat, že drsnost povrchu je stejná jako u běžných hliníkových slitin používaných pro technologii SLM. Součást bude ještě podrobena dalšímu testování a mechanickému opracování.



Obr. 5.36 Vyrobené turbodmychadlo navrhnuté pro Formuli student

6 DISKUZE

Z dostupných článků byly zjištěny mechanické vlastnosti referenčního materiálu v odlitém stavu a s tepelným zpracováním T6. Materiál AlSi7Mg0,6 dosahuje po odlití meze pevnosti 180 MPa a s tepelným zpracováním T6 může dosáhnout meze pevnosti až 357 MPa [50].

Prášek dodaný firmou SLM Solutions se mírně odchyloval od uváděných parametrů. Průměrná velikost částic prášku byla 49,6 μm . Nejčastěji byly v objemu zastoupeny částice o velikosti 45 μm . 90 % částic prášku mělo být dle výrobce do velikosti částic 60 μm , reálně však bylo zjištěno, že 90 % částic prášku je až do velikosti 97 μm a největší částice v prášku dosahují velikosti až 152 μm . Výrobce uváděná distribuce velikosti částic nebyla dodržena. Částice prášku měly mít sférický tvar, ale reálné snímky z analýzy prášku ukázaly, že částice mají spíše kornoutový protáhlý tvar. To by ale podle výrobce nemělo vést ke vzniku nadměrné porozity a k snížení mechanických vlastností materiálu. Použitý prášek v procesu výroby hraje významnou roli jako důležitý procesní parametr, jak uvádí KEMPEN [54].

Studium procesních parametrů začalo návarovým testem. Rozsah procesních parametrů byl pro výkon 175 - 400 W a pro skenovací rychlost 200 - 2000 mm/s. Z rešerše bylo zjištěno, že rozměrově vhodné a kontinuální návary by měly vznikat při vstupní energii do procesu od 4,76 do 10 J/mm². Celkový rozsah vstupní energie pro návarový test byl od 3,5 do 20 J/mm², aby mohla být sledována hranice mezi tvorbou vhodných a nevhodných návarů. Celkově byly návary rozděleny do tří hodnotících skupin na návary rozměrově nevhodné nebo obsahující póry, návary rozměrově vhodné dle podmínky (výška > 30 μm , průvar = 50 - 160 μm a úhel napojení = 90 - 170°), ale nekontinuální a návary rozměrově vhodné a kontinuální. Do první skupiny spadaly primárně návary s příliš vysokou a nebo nízkou vstupní energií. Návary s vysokou vstupní energií se vyznačovaly velkým průvarem, kdežto návary s nízkou energií se vyznačovaly malou výškou, nekontinuitou a nevhodným úhlem styku s podkladovým kvádrem. Z důvodu nedostatku vstupní energie a povrchového napětí taveniny měla roztavená lázeň tendenci zaujmout co nejmenší možný objem. Druhá skupina zahrnovala návary, které splnily rozměrovou podmínku, ale při vrchním pohledu bylo vidět, že návar je nekontinuální. To bylo způsobeno nevhodnou kombinací procesních parametrů, které způsobovaly tuto nestabilitu. Kontinuální a rozměrově vhodné návary byly pozorovány až při použití vyšších výkonů. To koresponduje s prací LOUISE [3], který doporučuje používat pro hliníkové slitiny výkon od 300 W. Vznikla skupina návarů v rozmezí výkonu laseru 325 - 400 W a rychlosti laseru 1000 - 1300 mm/s, které splňovaly požadavky rozměrů a kontinuity bez přítomnosti pórů. Hodnoty jejich vstupní energie se pohybovaly v rozmezí od 5 do 8 J/mm², což koreluje s původními předpoklady. Rozměrová analýza všech návarů ukázala, že průvar a šířka návarů klesá se zmenšující se energií, která vstupuje do procesu. Hodnota výšky návarů má kolísavý průběh bez náznaku jakéhokoliv trendu. To je pravděpodobně způsobeno navařením návarů na již nerovný povrch podkladového kvádrů s kombinací lokálních míst, kde kvůli vzniku prohlubně bylo nahrnuto více prášku.

Tenkostěnný test vycházel z výběru deseti nejlepších návarů z návarového testu. Procesní parametry pro výrobu tenkých stěn byly od 325 do 400 W výkonu laseru

a 900 - 1300 mm/s rychlosti laseru. Na tenkých stěnách byla sledována tloušťka jejich naskenování a dále rozřezáním stěn a vybroušením jejich příčných průřezů. Hodnoty tloušťky byly porovnány s šířkami návarů a bylo zjištěno, že tenké stěny daných parametrů jsou širší než návary. To je přisuzováno menšímu odvodu tepla při stavbě tenkých stěn než při stavbě návarů. Dalším hodnotícím kritériem byla směrodatná odchylka tloušťky stěny získaná z naskenovaných dat. Byly vybrány procesní parametry tenkých stěn, které měly nejmenší směrodatnou odchylku tloušťky stěny a zaručovaly tak nejstabilnější tvorbu návaru.

Parametry 350 W, 1100 mm/s; 350 W, 1200 mm/s; 375 W, 1200 mm/s; 375 W, 1300 mm/s výkonu laseru a rychlosti skenování z tenkostěnného testu byly následně použity do objemového testu I. Pro známé tloušťky stěn byly vypočítány hodnoty šrafovací vzdálenosti pro procentuální přesahy návarů 20 - 80 %. Analýzou objemu vzorků byl zjištěn trend snižující se závislosti porozity na rostoucí hodnotě procentuálního přesahu šrafovacích drah. Tato skutečnost je připisována tzv re-meltingu, který vzniká u vzorků s vyšším procentuálním přesahem drah. Vliv re-meltingu na vzniklou porozitu popisuje i YASA ve své práci [52]. U jednotlivých vzorků byla následně změřena mikrostvrdost, z které vyplývalo že největší tvrdosti dosahují vzorky s procentuálním přesahem drah 40 %. S rostoucí a snižující se hodnotou přesahu drah se tvrdost snižovala. Tento fakt je připisován rozpadu mikrostruktury, která se kvůli přetavování návarů u vysokých procentuálních přesahů šrafovacích drah projevuje rozpadem jemnozrné mikrostruktury a precipitací křemíku [31,32,55]. To vede k poklesu tvrdosti vzorků, která je definována právě vzniklou mikrostrukturou. V rámci objemového testu I byly testována šrafovací strategie "stripe" a "chess board" a jejich vliv na vzniklou porozitu při změně parametru vzdálenosti šrafovacích polí. Strategie "stripe" dosahovala výrazně menších hodnot porozit než strategie "chess board". Důvodem je přítomnost více čelních spojení jednotlivých drah laseru u strategie "chess board", které jsou kritickým místem pro vznik porozity. Pro obě strategie dosahovali nejmenší porozity vzorky se vzdáleností šrafovacích drah -0,051 mm. Záporná hodnota vzdálenosti označuje přesah a dokazuje, že díky přesahu je eliminován vznik větší porozity.

Stejné procesní parametry použité v objemovém testu I byly použity i v objemovém testu II, kde cílem bylo ověřit trend klesající porozity objemu vzorku s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah a pro parametry s nejnížší porozitou postavit tahové vzorky. V rámci objemového testu II byly postaveny čtyři sady vzorků po deseti vzorcích s procentuálním přesahem šrafovacích drah 40 - 80 %. V rámci testu byl sledován vliv polohy vzorku na platformě na výslednou porozitu. Ukázalo se, že vliv polohy vzorku na platformě z hlediska polohy na okraji vůči ve středu nemá vliv na výslednou porozitu. Malý vliv (asi kolem 5 %) může mít poloha vzorku vůči směru atmosféry. Tento vliv je, ale malý a nepravidelný na to, aby byl považován za reálné ovlivnění výsledků. V testu se potvrdil stejný trend klesající porozity s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah jako v objemovém testu I. Špatným vysušením prášku bylo ověřeno, že nevhodná příprava prášku před stavbou má výrazný vliv na porozitu vzorků. Všechny zbývající sady vzorků s dobře vysušeným práškem vykazovaly podobné hodnoty porozity. Nejnížší objemová porozita 0,084 % byla vyhodnocena u vzorku s 80% přesahem šrafovacích drah pro procesní parametry výkonu laseru 375 W a rychlosti 1200 mm/s. U vzorků

vyrobených těmito procesními parametry byla analyzována závislost počtu pórů na procentuálním přesahu šrafovacích drah. S rostoucím přesahem se počet pórů snižoval. Pro každý vzorek byla analyzována rozměrová distribuce pórů v objemu. S rostoucím přesahem šrafovacích drah byly nejvýrazněji eliminovány póry o rozměru 5 - 40 μm . V každém vzorku bylo několik jednotek pórů, které měly velikost větší než 100 μm . Jejich počet se s vzrůstajícím přesahem drah neměnil, pouze měly větší vliv na celkovou porozitu z důvodu úbytku pórů o velikostech 5 - 40 μm . U vzorků vyrobených stejnými procesními parametry byla měřena mikrotvrdość. Oproti objemovému testu I bylo zjištěno, že tvrdost jednotlivých vzorků se v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah nemění. Toto měření vyvrátilo předpoklad vlivu tepelně ovlivněných oblastí při velkých přesazích šrafovacích návarů na tvrdost vzorku, kterým bylo argumentováno u výsledků tvrdosti z objemového testu I. Naměřená průměrná tvrdost 110 HV odpovídá po přepočtu mezi pevností materiálu 350 MPa. V rámci objemového testu II byly postaveny vzorky na hodnocení drsnosti povrchu. Byl analyzován svislý, šikmý a šikmý převislý povrch (šikmé pod úhlem 45 a 135°). S měnícími parametry kontury dle vybraného rozsahu nedošlo k výrazné změně drsnosti povrchu. Nebyl potvrzen předpoklad klesající hodnot drsnosti povrchu s rostoucí skenovací rychlostí, jak uvádí DADBAKSH [38]. Pro detailnější analýzu by ovšem musel být test proveden pro větší rozsah procesních parametrů. Nebyla pozorována žádná závislost drsnosti povrchu na energii vnesené do objemu. S použitím pouze jedné dráhy laseru pro konturu vzrostla drsnost povrch zhruba o 50 % oproti použití dvou drah laseru pro konturu. Šikmé plochy dosahují větší drsnosti povrchu oproti svislým plochám primárně důvodu schodovitěho efektu. Ani zde nebyla pozorována výrazná závislost použitých parametrů kontury na drsnosti povrchu. Rozdíl drsnosti mezi horní a spodní šikmou plochou s převisem je pro spodní šikmou plochu asi o 20 % vyšší.

U objemových vzorků si lze všimnout výrazné podpovrchové porozity. Ta je způsobena z důvodu rozdílného odvodu tepla z povrchu vzorku než z jeho objemu. Pro odstranění podpovrchové porozity je nutné správně nastavit procesní parametry kontury, určit vzdálenost jednotlivých kontur od sebe a jejich počet a to vše s ohledem na vzniklou drsnost povrchu. V rámci povrchového testu byly měněny procesní parametry výkonu laseru od 300 do 325 W a rychlosti laseru od 900 do 1100 mm/s bez výrazného efektu na eliminaci podpovrchové porozity. Pro odladění podpovrchové porozity bude potřeba série testů s větším rozsahem procesních parametrů a vzdáleností kontur. Pro toto testování již nezbyla kapacita, aby byla provedena v rámci této diplomové práce.

Z vyrobených tahových vzorků parametry výkonu laseru 375 W a rychlosti skenování 1200 mm/s byly zjištěny mechanické vlastnosti materiálu. Bylo dosaženo meze pevnosti 380 MPa, meze kluzu 230 MPa a poměrného prodloužení 10 %. V porovnání s konvenčně odlévaným materiálem, viz 5.1 bez tepelného zpracování jsou mechanické vlastnosti výrazně vyšší. Dle literatury je možné zvýšit mechanické vlastnosti odlitého materiálu tepelným zpracováním T6. Díky tomuto zvýšení mechanických vlastností je mez pevnosti SLM materiálu o 8 % vyšší a mez kluzu o 25 % nižší.

V porovnání s ostatními materiály zpracovanými technologií SLM jsou mechanické vlastnosti porovnatelné nebo vyšší. Při srovnání se stejným materiálem zkoumaným v práci [10] je mez pevnosti o 10 % nižší a mez kluzu o 17 % nižší. Ve srovnání

s materiálem AlSi7Mg0,3 [5] je mez pevnosti o 5 % nižší a mez kluzu o 13 % vyšší. Při srovnávání mechanických vlastností různých materiálů z různých zdrojů je nutné brát v úvahu počáteční podmínky a procesní parametry, které mohou ovlivnit proces výroby a tím výsledné mechanické vlastnosti. Důležitými rozdílnostmi, kterými se tato práce liší od prací s příbuznými materiály zpracovanými technologií SLM [5,55], je kvalita dodaného prášku, tloušťka nanášené vrstvy a teplota platformy. Dalším procesem zpracování vyrobených součástí může být tepelné zpracování, které může přispět k modifikaci mechanických vlastností materiálu.

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo objasnit vliv procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny AlSi7Mg0,6 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu a jeho mechanické vlastnosti. V rámci práce byl prozkoumán vliv výkonu a rychlosti laseru na tvorbu jednotlivých návarů. Bylo zjištěno, že s rostoucí skenovací rychlostí klesá šířka a průvar návaru. Tento trend se potvrdil pro všechny výkony v návarovém testu. Stejný trend poklesu tloušťky stěny s rostoucí skenovací rychlostí byl sledován i u tenkostěnného testu. Tloušťka stěn byla průměrně větší o 8,5 % než šířka návarů z návarového testu z důvodu menšího odvodu tepla z jednonávarových stěn. Objemovým testem I byla zjištěna závislost klesající porozity vzorků s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah (zmenšující se šrafovací vzdálenost). Nejvhodnější skenovací strategií je strategie "stripe" se vzdáleností šrafovacích polí -0,051 mm. U objemového testu II byl potvrzen předpoklad klesající porozity vzorku s rostoucím procentuálním přesahem šrafovacích drah až na hodnotu porozity 0,084 % pro vzorek vyrobený procesními parametry výkonu laseru 375 W a rychlosti laseru 1200 mm/s. Vzorek obsahoval i nejmenší počet pórů. Průměrná tvrdost vzorků dosahovala hodnoty 110 HV a byla pro všechny vzorky s rozdílnou hodnotou procentuální vzdálenosti šrafovacích polí stejná. Test drsnosti vzorků neprokázal žádnou výraznou závislost drsnosti na procesních parametrech kontury. Nejnižší drsnost svislé plochy pro parametry kontury 325 W výkonu laseru a 1100 mm/s rychlosti laseru byla 11,3 μm . Tahové vzorky postavené s parametry výkonu laseru 375 W, rychlosti laseru 1200 mm/s dosáhly meze pevnosti 380 MPa, meze kluzu 230 MPa a poměrného prodloužení 10 %. V celém výzkumu práce byla snaha vycházet z obecných zásad procesu aditivní výroby hliníkových slitin zmíněných v rešerši a dle ní hodnotit dosažené výsledky. Výsledky této práce korespondují s poznatky jiných autorů zabývajících se materiálovým výzkumem podobných slitin. Tato práce se zabývá studiem procesních parametrů a nabízí základní poznatky pro hlubší analýzu zpracování hliníkové slitiny AlSi7Mg0,6 aditivní technologií Selective Laser Melting.

Materiál AlSi7Mg0,6 je standardně certifikovaný pro letectví a kosmonautiku. Dalším postupem práce pro kvantifikování tohoto materiálu pro použití v tomto odvětví by měla být eliminace podpovrchové porozity při snížení drsnosti povrchu vyrobených součástí a širší otestování procesních parametrů pro stavbu tenkostěnných struktur.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SAMUEL, A.M., G.H. GARZA-ELIZONDO, H.W. DOTY a F.H. SAMUEL. Role of modification and melt thermal treatment processes on the microstructure and tensile properties of Al-Si alloys. *Materials & Design* . 2015, 80, 99-108. ISSN 02613069.
- [2] OLAKANMI, E.O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology* . 2013, 213(8), 1387-1405. ISSN 09240136.
- [3] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* . 2011, 211(2), 275-284. ISSN 09240136.
- [4] SLM solution . [cit. 2017-03-28]. Dostupné z :<https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slm-metal-powder>
- [5] KIMURA, Takahiro a Takayuki NAKAMOTO. Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. *Materials and Design* . 2016, 89, 1294-1301. ISSN 18734197.
- [6] Wohlers, T, 2012, Wohlers Report 2012 – Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates Inc., Fort Collins, USA.
- [7] WOHLERS, Terry a Tim GORNET. History of additive manufacturing Introduction of non-SL systems Introduction of low-cost 3D printers. *Wohlers Report* 2012. 2012, 1-23.
- [8] WOHLERS, T., CAFFREY, T. Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, 2015, 314 p. ISBN 9780991333219.
- [9] CLARE, Adam T., Paul R. CHALKER, Sean DAVIES, Christopher J. SUTCLIFFE a Sozos TSOPANOS. Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* . 2008, 4(2), 181-187. ISSN 15691713.
- [10] RAO, Heng, Stephanie GIET, Kun YANG, Xinhua WU a Chris H J DAVIES. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting. *JMADE* [online]. 2016, 109, 334-346. ISSN 0264-1275. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matdes.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.009)
- [11] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and Design* . 2012, 34, 159-169. ISSN 02641275.

- [12] KRUTH, J-P., P. MERCELIS, J. VAERENBERGH, L. FROYEN a M. ROMBOUTS. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* . 2004, 11(1), 26-36. ISSN 1355-2546.
- [13] YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009. ISBN 3838317947.
- [14] DIN-50125-2004. Scribd - Read books, audiobooks, and more [online]. Copyright © 2018 Scribd Inc. [cit. 15.05.2018]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/259280013/DIN-50125-2004>
- [15] YADROITSEV, I. a I. SMUROV. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia* . 2010, 5(PART 2), 551-560. ISSN 18753884.
- [16] LI, Ruidi, Jinhui LIU, Yusheng SHI, Li WANG a Wei JIANG. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* . 2012, 59(9-12), 1025-1035. ISSN 02683768.
- [17] DAS, Suman. Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. *Advanced Engineering Materials* . 2003, 5(10), 701-711. ISSN 14381656.
- [18] DAI, Donghua a Dongdong GU. Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments. *Materials and Design* . 2014, 55, 482-491. ISSN 18734197.
- [19] TRADOWSKY, U., J. WHITE, R. M. WARD, N. READ, W. REIMERS a M. M. ATTALLAH. Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development. *Materials and Design* . 2016, 105, 212-222. ISSN 18734197.
- [20] YASA, Evren, Jan DECKERS a Jean-Pierre KRUTH. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. *Rapid Prototyping Journal* . 2011, 17(5), 312-327. ISSN 1355-2546.
- [21] THIJS, Lore, Karolien KEMPEN, Jean Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* . 2013, 61(5), 1809-1819. ISSN 13596454.
- [22] KRUTH, J. P., L. FROYEN, J. VAN VAERENBERGH, P. MERCELIS, M. ROMBOUTS a B. LAUWERS. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology* . 2004, 149(1-3), 616-622. ISSN 09240136.
- [23] Hofmann Innovation Group Website ? Concept . [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.hofmann-innovation.com/en/technologies/direct-cusing-manufacturing.html>

- [24] KEMPEN, K, L THIJS, J Van HUMBEECK a J KRUTH. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting . 2012, 39, 439-446. ISSN 1875-3892.
- [25] REPORT, Technical, Uta STEEGER, Shimizu CORPORATION a Uta STEEGER. Very High Cycle Fatigue (VHCF) Assessment of Laser Additive Manufactured (LAM) AlSi12 Alloy. 2015, (January).
- [26] LI, Wei, Shuai LI, Jie LIU, Ang ZHANG, Yan ZHOU, Qingsong WEI, Chunze YAN a Yusheng SHI. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. Materials Science and Engineering A . 2016, 663, 116-125. ISSN 09215093.
- [27] PRASHANTH, K. G., S. SCUDINO, H. J. KLAUSS, K. B. SURREDDI, L. LÖBER, Z. WANG, A. K. CHAUBEY, U. KÜHN a J. ECKERT. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. Materials Science and Engineering A . 2014, 590, 153-160. ISSN 09215093.
- [28] WU, J., X.Q. WANG, W. WANG, M.M. ATTALLAH a M.H. LORETTO. Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg. Acta Materialia . 2016, 117, 311-320. ISSN 13596454.
- [29] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews . 2015, 2(4). ISSN 19319401.
- [30] KANG, Nan, Pierre CODDET, Lucas DEMBINSKI, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and strength analysis of eutectic Al-Si alloy in-situ manufactured using selective laser melting from elemental powder mixture. Journal of Alloys and Compounds . 2017, 691, 316-322. ISSN 09258388.
- [31] KIMURA, Takahiro., Takayuki NAKAMOTO, Masataka MIZUNO a Hideki ARAKI. Effect of silicon content on densification, mechanical and thermal properties of Al-xSi binary alloys fabricated using selective laser melting. Materials Science and Engineering: A . 2016, 682(November 2016), 593-602. ISSN 09215093.
- [32] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. Additive Manufacturing . 2014, 1, 77-86. ISSN 22148604.
- [33] YANG, Chang Lin, Yuan Bing LI, Bo DANG, He Bin LÜ a Feng LIU. Effects of cooling rate on solution heat treatment of as-cast A356 alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition) . 2015, 25(10), 3189-3196. ISSN 10036326.

- [34] SURYAWANSHI, Jyoti, K. G. PRASHANTH, S. SCUDINO, J. ECKERT, Om PRAKASH a U. RAMAMURTY. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting. *Acta Materialia* . 2016, 115, 285-294. ISSN 13596454.
- [35] READ, Noriko, Wei WANG, Khamis ESSA a Moataz M. ATTALLAH. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design* . 2015, 65, 417-424. ISSN 18734197.
- [36] KANG, Nan, Pierre CODDET, Hanlin LIAO, Tiphaine BAUR a Christian CODDET. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting. *Applied Surface Science* . 2016, 378, 142-149. ISSN 01694332.
- [37] ARTICLE, Original. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS . 2013, 2743-2751.
- [38] DADBAKHS, S, L HAO, P G E JERRARD a D Z ZHANG. Experimental investigation on selective laser melting behaviour and processing windows of in situ reacted Al / Fe₂O₃ powder mixture. *Powder Technology* . 2012, 231, 112-121. ISSN 0032-5910.
- [39] YE, Haizhi. An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance* . 2003, 12(3), 288-297. ISSN 10599495.
- [40] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [41] WARMUZEK, M. *Aluminium-Silicon Casting Alloys : Atlas of Microfractography*. 1. vyd. USA: ASM International, 2004. 124 s. ISBN 0-87170-794-2.
- [42] HRČKOVÁ, M. *Optimalizace tepelného zpracování slitiny hliníku AlSi7Mg0,6*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Juliš, Ph.D..
- [43] Selective Laser Melting Machine SLM 280 2.0 | SLM Solutions. SLM Solutions | . Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slm-280-20>
- [44] DOKOUPIL, F. *Zpracování slitiny 2618 pomocí technologie selective laser melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 123 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..
- [45] SPIERINGS, a.B., M. SCHNEIDER a R. EGGENBERGER. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal* . 2011, 17(5), 380-386. ISSN 1355-2546
- [46] ZEMANOVÁ, L. *Identifikace únavového poškození Al slitiny zpracované technologií SLM s využitím metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické

- v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 96 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [47] Česká republika. Hodnocení výsledky výzkumných organizací a hodnocení výsledky ukončených programů. In: 1417/2013-RVV. Praha, 2013, s. 475.
- [48] KOČICA, M. Zpracování slitin mědi pomocí technologie selective laser melting. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 115 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..
- [49] CHEN, Zhongwei, Xiaolei HAO, Yu WANG a Kai ZHAO. In-situ Observation of Tensile Fracture in A357 Casting Alloys. Journal of Materials Science and Technology [online]. 2014, 30(2), 139?145. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2013.04.014
- [50] LEE, D, W D PFOST, D L THOMPSON, M PATTERSON, J FOYOS a R MARLOTH. Alternative heat treatments for A357-T6 aluminum alloy. 2002, 9.
- [51] MORGAN, R H, A J PAPWORTH, C SUTCLIFFE, P FOX a W O NEILL. High density net shape components by direct laser re-melting of single-phase powders [online]. 2002, (January). Dostupné z: doi:10.1023/A
- [52] YASA, Evren, Jan DECKERS a Jean-pierre KRUTH. selective laser melting parts The investigation of the influence of laser re-melting on density , surface quality and microstructure of selective laser melting parts [online]. 2011. Dostupné z: doi:10.1108/13552541111156450
- [53] A357.0 (A357.0-T61, A13570) Cast Aluminum :: MakeItFrom.com. MakeItFrom.com: Material Properties Database [online]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/A357.0-A357.0-T61-A13570-Cast-Aluminum>
- [54] Kempen a et. al, 2011, 'Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg', paper presented to 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011

SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÝCH VELIČIN

$3D$		Třídimenzionální
CAD		Computer Aided Design
SLM		Selective laser melting
$T6$		Stav tepelného zpracování pro zvýšení tvrdosti
μCT		Micro Computer Tomography
E_d	J/mm^3	Hustota energie vstupující do procesu
P	W	Výkon laseru
v	mm/s	Skenovací rychlost laseru
d	mm	Vzdálenost šraf
t	mm	Tloušťka vrstvy
S_v	μm	šrafovací vzdálenost
S_n	μm	šířka návaru
p_p_d	$\%$	Procentuální přesah drah

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vrtule pro závodní lodě vyrobené z hliníkové slitiny technologií SLM [4]	15
2.1	Graf popisující počet prodaných systémů zpracovávající kovové materiály aditivní technologií. Svislá osa označuje počet prodaných systémů a horizontální konkrétní rok [6]	16
2.2	Graf zobrazující užívání SLM technologie v různých odvětvích [8] . .	17
2.3	Průběh výroby součásti SLM technologií [29]	17
2.4	Princip procesu SLM [11]	18
2.5	Princip funkce stroje SLM s popisem jednotlivých částí [12]	18
2.6	Tabulka rozdělení procesních parametrů [32]	19
2.7	Graf závislosti tvorby naváru na hodnotách výkonu laseru a jeho rychlosti [15]	20
2.8	A) Nanášení první vrstvy prášku, B) vznik balling efektu po skenování laserem, C) nanášení druhé vrstvy prášku, D) další vznik balling efektu po skenování laserem a zablokování nanášecího mechanismu [16]	21
2.9	Proudění bublin v tavenině v závislosti na vstupní hodnotě lineární hustoty energie (LED) [18]	22
2.10	A - Působení Marangoniho sil v roztavené lázni. B - Porušení oxidačního filmu při tuhnutí lázně [3]	23
2.11	Schodovitý efekt SLM dílů. I - tloušťka vrstvy, α - úhel povrchu, s - velikost schodu [20]	23
2.12	Skenovací strategie: A - jednosměrná, B - obousměrná, C - obousměrná s pootočením o 90°, D - island strategy, E - island strategy s pootočením o 90° a posuvem [21]	24
2.13	Vliv SLR na výslednou porozitu součásti při různých hodnotách procesních parametrů [20]	24
2.14	Vliv orientace stavby tahových vzorků materiálu AlSi10Mg [24] . . .	25
2.15	Graf zobrazující podíl materiálů užívaných v SLM technologii [29] . .	26
2.16	Graf závislosti podílu Si na hodnotě vstupní hustoty energie pro dosažení maximální relativní hustoty [31]	27
2.17	Fázový diagram Al-Si slitiny [41]	28
2.18	Fázový diagram Al-Si slitiny [40,42]	29
2.19	A - struktura konvenčně odlévané slitiny AlSi12, B - struktura AlSi12 vyrobená SLM [34]	29
2.20	Graf závislosti napětí v tahu na poměrném prodloužení pro slitinu AlSi12 [27]	30
2.21	Graf závislosti hodnoty meze kluzu na úhlu natočení vzorku vůči stavěcí desce [27]	31
2.22	Graf zobrazující hodnoty meze pevnosti a meze kluzu v tahu s hodnotami podélného prodloužení [35]	31
2.23	Graf porovnávající mechanické vlastnosti vzorků v závislosti na podílu křemíku v Al-Si [31]	32

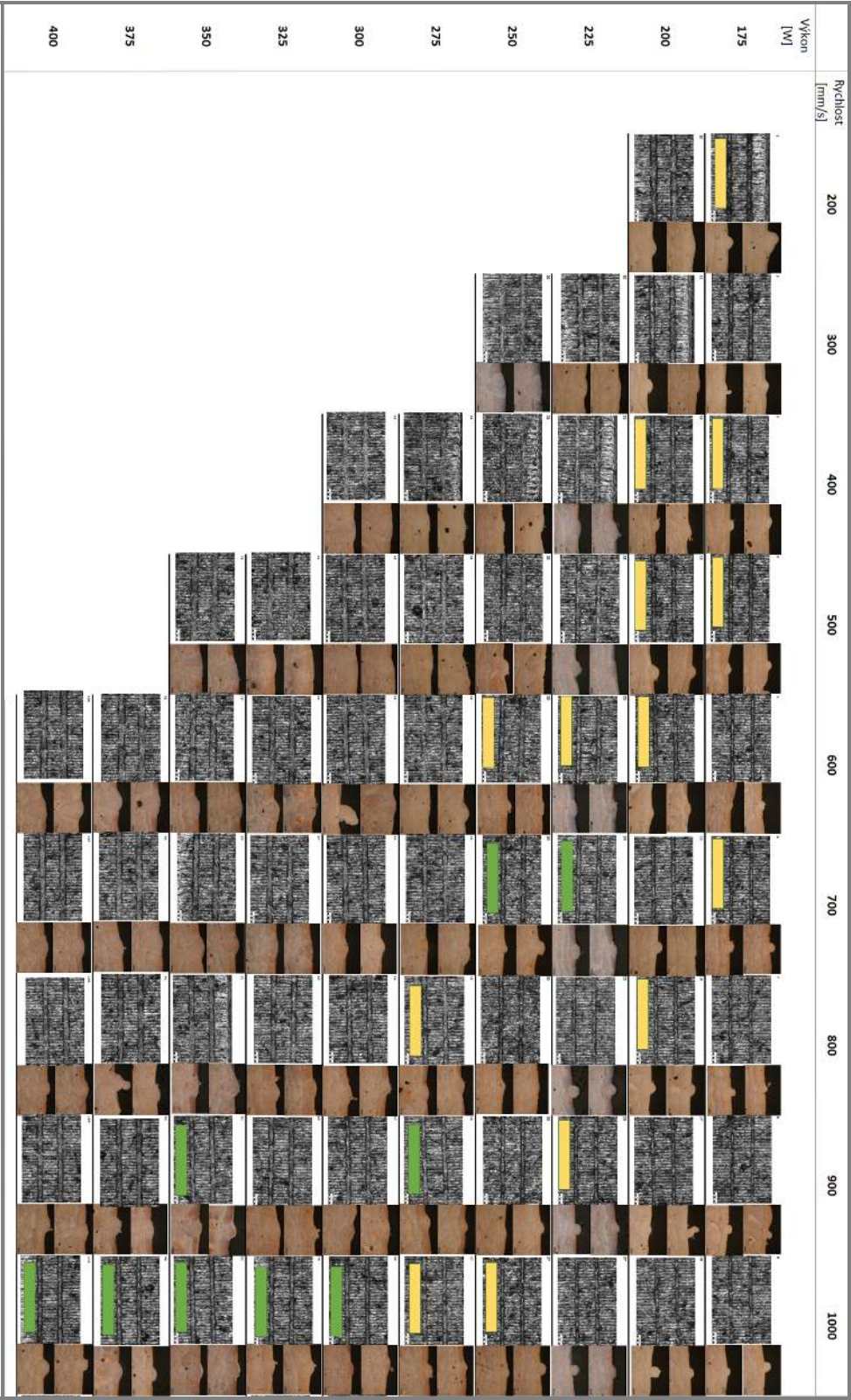
2.24	Graf závislosti ohybového napětí na počtu cyklů do lomu (vlevo), detailní pohled na lomovou plochu a místo iniciace trhliny (vpravo) [34]	33
2.25	Graf zobrazující průběh hodnot napětí závislých na počtu cyklů do lomu [11]	34
2.26	Závislost drsnosti povrchu na použitých procesních parametrech pro materiál AlSi10Mg [37]	35
2.27	Grafy závislosti hodnoty drsnosti povrchu na vstupní hustotě energie pro materiál čistého hliníku s příměsí Fe ₂ O ₃ [38]	35
2.28	Graf závislosti použité strategie skenování na výsledné relativní hustotě dílu [32]	36
2.29	Graf závislosti meze pevnosti v tahu na poměrném prodloužení [27]	37
2.30	Zobrazení způsobu vylučování Si při vzrůstající teplotě žíhání [27]	37
2.31	Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žíhání pro tepelné zpracování T5 [5]	37
2.32	Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žíhání [19], AF - vzorek bez tepelného zpracování, H - horizontální orientace vzorku při stavbě, M - obrobený tahový vzorek	38
2.33	Grafy závislosti mechanických vlastností v tahu na teplotě žíhání [26]. (a) - Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení žíhaných tahových vzorků, (b) - Závislost tahového napětí a poměrného prodloužení na hodnotě žíhací teploty, (c) - Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení vzorků podrobených umělému stárnutí, (d) - Graf dosažené tvrdosti v závislosti na použitém tepelném zpracování a teplotě žíhání	39
4.1	Parametry zařízení SLM 280 ^{HL} [43]	42
4.2	Pohled zepředu použitého zařízení SLM 280 ^{HL} [48]	43
4.3	Vnitřní komora použitého zařízení SLM 280 ^{HL} [48]	43
4.4	Schématické znázornění plánu práce	45
4.5	Podkladový kvádr návarového testu	46
4.6	Tahový vzorek vyrobený technologií SLM před obrobením (nahore), obrobený tahový vzorek dle DIN 50125 (dole) [14]	47
5.1	Histogram rozložení částic prášku AlSi7Mg0,6 od SLM Solutions	50
5.2	Makroskopický snímek tvaru částic	50
5.3	Detailní snímek tvaru částic	51
5.4	Mapa procesních parametrů návarového testu	52
5.5	Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro výkon 375 W. Graf nahore zobrazuje rozměry pro návar skenovaný proti proudu atmosféry, dolní graf zobrazuje návar skenovaný po proudu atmosféry	53
5.6	Procesní mapa návarového testu s ohodnocenými návary	53
5.7	Procesní mapa návarového testu s vyznačenými parametry použitými v tenkostěnném testu	55
5.8	Vlevo: Vzorek pro tenkostěnný test. Na obrázku je znázorněn směr stavby vzorku a roviny analyzovaného průřezu. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě. Čísla uprostřed vzorků znázorňují jejich pořadové číslo	56

5.9	Graf závislosti tloušťky stěny na skenovací rychlosti pro jednotlivé výkony laseru	56
5.10	Graf porovnání tlouštěk stěn z naskenovaných dat a výbrusů s šířkou návarů pro jednotlivé procesní parametry	57
5.11	Graf závislosti vstupní energie do procesu na směrodatné odchylce tloušťky stěny	57
5.12	Ukázka vybroušených průřezů tenkých stěn. 1 - 350 W, 1100 mm/s; 2 - 350 W, 1200 mm/s; 3 - 375 W, 1200 mm/s; 4 - 375 W, 1300 mm/s	59
5.13	Ukázka přesahu návaru o šířce 285 μm při 20% a 80% přesahu. Šrafovací vzdálenost pro tyto přesahy odpovídá hodnotám 217 a 54 μm	60
5.14	Vlevo: Vzorek pro objemový test I. Na obrázku je znázorněna neměnná orientace drah laseru, směr stavby vzorku a rovina analyzovaného průřezu. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě. Čísla vedle vzorků znázorňují procentuální přesah šrafovacích drah	60
5.15	Schématická ukázka skenovací strategie "stripe" (vlevo) a skenovací strategie "chess board" (vpravo)	61
5.16	Vlevo: Tabulka s hodnotami vzdáleností šrafovacích polí pro jednotlivé vzorky Vpravo: Rozložení vzorků na platformě pro test strategií. Hodnota uprostřed vzorku označuje jeho pořadové číslo	61
5.17	Graf závislosti porozity na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro procesní parametry výkonu laseru 375 W a rychlosti skenování laseru 1300 mm/s	62
5.18	Ukázka vybroušených průřezů vzorků z objemového testu I. Číslo ve vzorku označuje jeho procentuální přesah šrafovacích drah. Červené pole uvnitř prvního vzorku znázorňuje oblast výpočtu objemové porozity vzorků.	63
5.19	Ukázka naleptaného příčného výbrusu vzorku objemového testu I s detailním pohledem na jednotlivé návary	64
5.20	Graf závislosti šířek návarů v objemu vzorku na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro výkon 375 W a rychlost skenování 1300 mm/s.	64
5.21	Graf zobrazující hodnoty mikrotvrdosti v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah.	65
5.22	Graf srovnání vzniklé porozity ve vzorku pro strategii šrafování "stripe" a "chess board" v závislosti na vzdálenosti mezi šrafovacími poli	65
5.23	Srovnání vzorků výrobních strategií "stripe" (vlevo) a strategií "chess board" (vpravo)	66
5.24	Vlevo: Vzorek se zkosenými hranami pro hodnocení svislého a zkoseného povrchu. Vpravo: Vzorek pro hodnocení svislého povrchu	68
5.25	Vpravo: Rozložení vzorků na platformě pro objemový test II. Vlevo: Vzorek pro objemový test II. Na obrázku jsou znázorněny jeho rozměry, rovina analyzovaného řezu a směr stavby	68
5.26	Graf zobrazující srovnání hodnot porozity pro jednotlivé procesní parametry v závislosti na hodnotě procentuálního přesahu šrafovacích drah	69

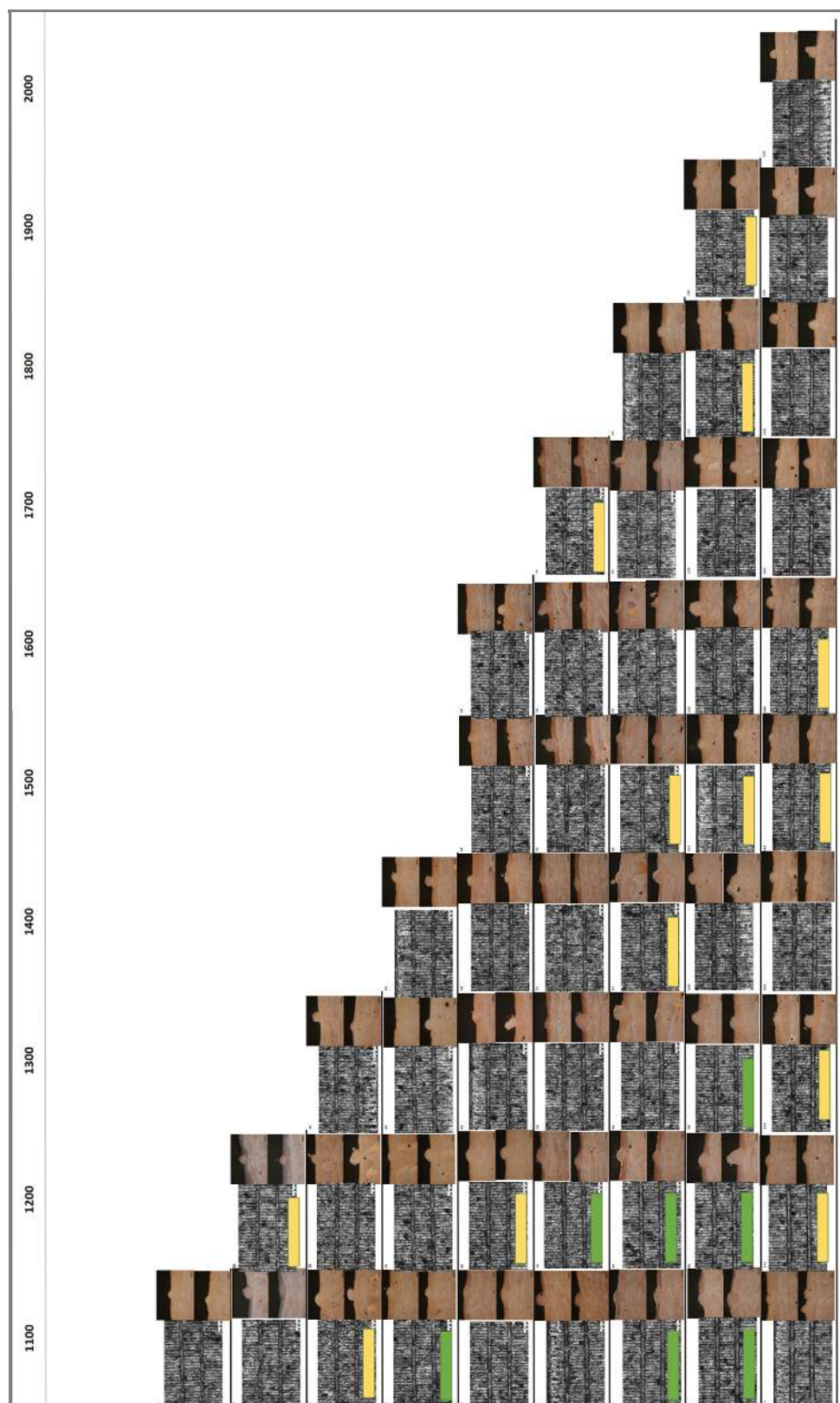
5.27	Ukázky vybroušených vzorků. Číslo ve vzorku zobrazuje procentuální přesah šrafovacích drah vzorku. Červené ohraničení v prvním vzorku zleva zobrazuje oblast, z které byla vyhodnocována porozita.	69
5.28	Vlevo: Graf závislosti porozity na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro procesní parametry 375 W, 1200 mm/s. Vpravo: Ukázka rozložení vzorků na platformě	70
5.29	Graf zobrazující počet pórů pro jednotlivé procesní parametry v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah	70
5.30	Graf počtu pórů v jednotlivých velikostech pro různé procentuální přesahy šrafovacích drah	71
5.31	Krabicový graf zobrazující střední, maximální a minimální hodnoty naměřené tvrdosti v závislosti na procentuálním přesahu šrafovacích drah pro vzorky vyrobené procesními parametry výkonu laseru 350 W a 1200 mm/s rychlosti laseru.	71
5.32	Graf zobrazující drsnost svislého povrchu pro jednotlivé procesní parametry kontury. Čísla nad sloupci udávají objemovou energii, s kterou byl skenován objem vzorku.	72
5.33	Grafy zobrazující drsnost šikmých povrchů pro jednotlivé procesní parametry kontury. Čísla nad sloupci udávají objemovou energii, s kterou byl skenován objem vzorku.	72
5.34	Obrázek platformy s vytisklými tahovými vzorky. Šipka zobrazuje směr proudění atmosféry	74
5.35	Graf zobrazující průběh tahové zkoušky	75
5.36	Vyrobené turbodmychadlo navrhnuté pro Formuli student	76
5.37	Rozložení jednotlivých součástí na stavební desce	77
7.1	Procesní mapa návarového testu - část 1	93
7.2	Procesní mapa návarového testu - část 2	94
7.3	Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 1	95
7.4	Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 2	96
7.5	Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 3	97
7.6	Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro daný výkon laseru - část 1	98
7.7	Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro daný výkon laseru - část 2	99
7.8	Mapa vybroušených vzorků objemového testu II	100
7.9	Grafy rozměrové distribuce vzorků objemového testu II postavené procesními parametry 375 W výkon laseru a 1200 mm/s skenovací rychlost laseru pro jednotlivé procentuální přesahy šrafovacích drah .	101

PŘÍLOHY

1. Manuskript článku do odborného časopisu



Obr. 7.1 Procesní mapa návarového testu - část 1



Obr. 7.2 Procesní mapa návarového testu - část 2

Název	Šířka [μm]	Výška [μm]	Průvar [μm]	Úhel [°]	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	E _a [J/mm ²]	Zhodnocení
Návar "1" D " - proti atm	375	162	76	159	175	200	17,50	
Návar "1" U "	219	82	58	129	175	200	17,50	
Návar "2" D " - proti atm	227	52	83	151	175	300	11,67	
Návar "2" U "	188	23	68	160	175	300	11,67	
Návar "3" D " - proti atm	209	49	71	150	175	400	8,75	
Návar "3" U "	199	61	58	129	175	400	8,75	
Návar "4" D " - proti atm	176	58	53	143	175	500	7,00	
Návar "4" U "	213	55	68	123	175	500	7,00	
Návar "5" D " - proti atm	189	58	66	121	175	600	5,83	
Návar "5" U "	184	12	60	206	175	600	5,83	
Návar "6" D " - proti atm	161	81	57	91	175	700	5,00	
Návar "6" U "	184	78	54	99	175	700	5,00	
Návar "7" D " - proti atm	156	33	64	244	175	800	4,38	
Návar "7" U "	146	69	50	74	175	800	4,38	
Návar "8" D " - proti atm	136	72	40	91	175	900	3,89	
Návar "8" U "	167	65	62	92	175	900	3,89	
Návar "9" D " - proti atm	177	90	43	113	175	1000	3,50	
Návar "9" U "	162	47	54	139	175	1000	3,50	
Návar "10" D " - proti atm	381	37	184	163	200	200	20,00	
Návar "10" U "	344	70	204	140	200	200	20,00	
Návar "11" D " - proti atm	298	41	158	141	200	300	13,33	
Návar "11" U "	267	81	100	133	200	300	13,33	
Návar "12" D " - proti atm	285	57	134	147	200	400	10,00	
Návar "12" U "	242	55	75	141	200	400	10,00	
Návar "13" D " - proti atm	247	74	95	143	200	500	8,00	
Návar "13" U "	256	104	84	121	200	500	8,00	
Návar "14" D " - proti atm	215	42	71	150	200	600	6,67	
Návar "14" U "	229	33	69	162	200	600	6,67	
Návar "15" D " - proti atm	217	12	73	201	200	700	5,71	
Návar "15" U "	216	78	70	125	200	700	5,71	
Návar "16" D " - proti atm	230	68	63	128	200	800	5,00	
Návar "16" U "	202	78	69	121	200	800	5,00	
Návar "17" D " - proti atm	169	104	54	100	200	900	4,44	
Návar "17" U "	174	34	67	141	200	900	4,44	
Návar "18" D " - proti atm	176	63	41	122	200	1000	4,00	
Návar "18" U "	172	149	42	86	200	1000	4,00	
Návar "19" D " - proti atm	147	49	47	131	200	1100	3,64	
Návar "19" U "	159	42	50	121	200	1100	3,64	
Návar "20" D " - proti atm	387	31	222	169	225	300	15,00	
Návar "20" U "	343	40	224	150	225	300	15,00	
Návar "21" D "	285	52	126	148	225	400	11,25	
Návar "21" U " - proti atm	308	57	175	137	225	400	11,25	
Návar "22" D "	285	96	127	114	225	500	9,00	
Návar "22" U " - proti atm	294	12	168	176	225	500	9,00	
Návar "23" D "	272	51	123	137	225	600	7,50	
Návar "23" U " - proti atm	292	50	152	161	225	600	7,50	
Návar "24" D "	245	61	82	118	225	700	6,43	
Návar "24" U " - proti atm	245	48	121	170	225	700	6,43	
Návar "25" D "	207	117	89	87	225	800	5,63	
Návar "25" U " - proti atm	212	73	75	115	225	800	5,63	
Návar "26" D "	200	85	65	116	225	900	5,00	
Návar "26" U " - proti atm	201	53	79	113	225	900	5,00	
Návar "27" D "	166	111	44	68	225	1000	4,50	
Návar "27" U " - proti atm	229	60	70	128	225	1000	4,50	
Návar "28" D "	189	15	75	168	225	1100	4,09	
Návar "28" U " - proti atm	221	90	67	117	225	1100	4,09	
Návar "29" D "	168	47	55	135	225	1200	3,75	
Návar "29" U " - proti atm	160	78	55	113	225	1200	3,75	
Návar "30" D "	387	34	273	170	250	300	16,67	
Návar "30" U " - proti atm	385	21	275	162	250	300	16,67	
Návar "31" D "	335	32	246	165	250	400	12,50	
Návar "31" U " - proti atm	319	29	224	147	250	400	12,50	
Návar "32" D "	290	82	129	116	250	500	10,00	
Návar "32" U " - proti atm	300	27	180	245	250	500	10,00	
Návar "33" D "	275	62	133	134	250	600	8,33	
Návar "33" U " - proti atm	288	32	160	130	250	600	8,33	
Návar "34" D "	247	55	109	109	250	700	7,14	
Návar "34" U " - proti atm	265	119	92	115	250	700	7,14	
Návar "35" D "	229	40	73	170	250	800	6,25	
Návar "35" U " - proti atm	245	25	130	170	250	800	6,25	
Návar "36" D "	195	22	71	163	250	900	5,56	
Návar "36" U " - proti atm	217	49	92	125	250	900	5,56	
Návar "37" D "	201	35	71	152	250	1000	5,00	
Návar "37" U " - proti atm	214	98	67	115	250	1000	5,00	
Návar "38" D "	194	109	53	97	250	1100	4,55	
Návar "38" U " - proti atm	245	82	74	139	250	1100	4,55	
Návar "39" D "	222	156	78	101	250	1200	4,17	
Návar "39" U " - proti atm	212	60	64	128	250	1200	4,17	
Návar "40" D "	177	44	84	153	250	1300	3,85	
Návar "40" U " - proti atm	172	109	41	100	250	1300	3,85	

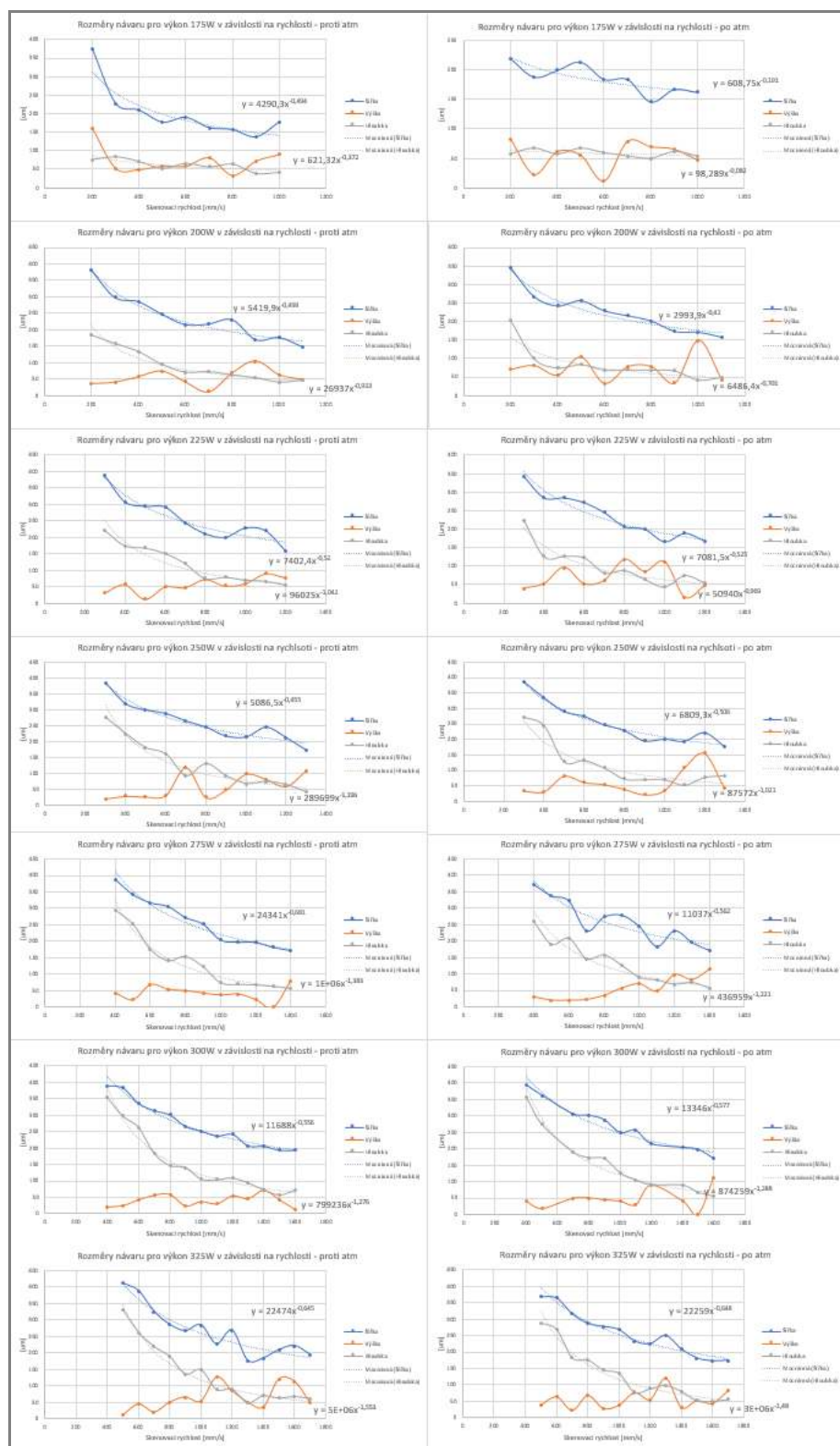
Obr. 7.3 Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 1

Název	Šířka [μm]	Výška [μm]	Průvar [μm]	Úhel [°]	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	E _s [J/mm ²]	Zhodnocení
Návar "41" D " - proti atm	389	43	295	141	275	400	13,75	
Návar "41" U "	372	31	261	172	275	400	13,75	
Návar "42" D " - proti atm	343	23	253	164	275	500	11,00	
Návar "42" U "	338	20	191	166	275	500	11,00	
Návar "43" D " - proti atm	318	68	176	136	275	600	9,17	
Návar "43" U "	322	20	209	159	275	600	9,17	
Návar "44" D " - proti atm	307	54	142	143	275	700	7,86	
Návar "44" U "	232	22	146	160	275	700	7,86	
Návar "45" D " - proti atm	273	50	155	148	275	800	6,88	
Návar "45" U "	274	35	158	152	275	800	6,88	
Návar "46" D " - proti atm	253	43	124	157	275	900	6,11	
Návar "46" U "	279	57	126	151	275	900	6,11	
Návar "47" D " - proti atm	204	37	75	154	275	1000	5,50	
Návar "47" U "	245	70	89	102	275	1000	5,50	
Návar "48" D " - proti atm	198	40	70	140	275	1100	5,00	
Návar "48" U "	184	48	81	134	275	1100	5,00	
Návar "49" D " - proti atm	197	24	69	127	275	1200	4,58	
Návar "49" U "	232	98	68	100	275	1200	4,58	
Návar "50" D " - proti atm	182	0	65	210	275	1300	4,23	
Návar "50" U "	196	83	74	123	275	1300	4,23	
Návar "51" D "	172	115	55	70	275	1400	3,93	
Návar "51" U " - proti atm	172	78	58	102	275	1400	3,93	
Návar "52" D "	393	39	356	124	300	400	15,00	
Návar "52" U " - proti atm	389	21	354	164	300	400	15,00	
Návar "53" D " -	362	18	273	172	300	500	12,00	
Návar "53" U " - proti atm	383	25	297	175	300	500	12,00	
Návar "54" D "	208	291	44	65	300	600	10,00	
Návar "54" U " - proti atm	336	42	263	164	300	600	10,00	
Návar "55" D "	305	49	189	160	300	700	8,57	
Návar "55" U " - proti atm	314	56	184	158	300	700	8,57	
Návar "56" D "	301	50	172	158	300	800	7,50	
Návar "56" U " - proti atm	301	59	147	139	300	800	7,50	
Návar "57" D "	287	44	169	148	300	900	6,67	
Návar "57" U " - proti atm	266	24	141	167	300	900	6,67	
Návar "58" D "	248	40	126	159	300	1000	6,00	
Návar "58" U " - proti atm	252	37	106	164	300	1000	6,00	
Návar "59" D "	255	29	104	162	300	1100	5,45	
Návar "59" U " - proti atm	237	30	104	159	300	1100	5,45	
Návar "60" D "	214	88	89	109	300	1200	5,00	
Návar "60" U " - proti atm	242	54	109	138	300	1200	5,00	
Návar "61" D " - proti atm	207	46	94	144	300	1300	4,62	
Návar "61" U "	169	170	43	106	300	1300	4,62	
Návar "62" D " - proti atm	206	71	73	115	300	1400	4,29	
Návar "62" U "	203	41	88	134	300	1400	4,29	
Návar "63" D " - proti atm	194	42	58	151	300	1500	4,00	
Návar "63" U "	197	0	66	234	300	1500	4,00	
Návar "64" D " - proti atm	194	13	73	149	300	1600	3,75	
Návar "64" U "	169	110	54	108	300	1600	3,75	
Návar "65" D " - proti atm	411	11	329	173	325	500	13,00	
Návar "65" U "	369	39	289	163	325	500	13,00	
Návar "66" D " - proti atm	388	44	262	147	325	600	10,83	
Návar "66" U "	365	63	270	156	325	600	10,83	
Návar "67" D " - proti atm	325	20	218	153	325	700	9,29	
Návar "67" U "	316	22	183	168	325	700	9,29	
Návar "68" D " - proti atm	285	50	188	147	325	800	8,13	
Návar "68" U "	287	67	177	125	325	800	8,13	
Návar "69" D " - proti atm	266	65	135	147	325	900	7,22	
Návar "69" U "	278	28	146	163	325	900	7,22	
Návar "70" D " - proti atm	284	53	148	157	325	1000	6,50	
Návar "70" U "	268	38	136	152	325	1000	6,50	
Návar "71" D " - proti atm	226	126	88	98	325	1100	5,91	
Návar "71" U "	233	76	78	104	325	1100	5,91	
Návar "72" D " - proti atm	268	84	89	136	325	1200	5,42	
Návar "72" U "	225	55	89	152	325	1200	5,42	
Návar "73" D " - proti atm	176	50	48	130	325	1300	5,00	
Návar "73" U "	250	119	99	76	325	1300	5,00	
Návar "74" D " - proti atm	183	35	69	151	325	1400	4,64	
Návar "74" U "	208	31	81	160	325	1400	4,64	
Návar "75" D " - proti atm	208	120	62	65	325	1500	4,33	
Návar "75" U "	181	52	52	122	325	1500	4,33	
Návar "76" D " - proti atm	221	113	67	108	325	1600	4,06	
Návar "76" U "	172	43	51	115	325	1600	4,06	
Návar "77" D " - proti atm	194	49	61	116	325	1700	3,82	
Návar "77" U "	174	82	56	128	325	1700	3,82	
Návar "78" D " - proti atm	402	25	346	173	350	500	14,00	
Návar "78" U "	395	29	313	170	350	500	14,00	
Návar "79" D " - proti atm	364	49	305	151	350	600	11,67	
Návar "79" U "	355	58	335	163	350	600	11,67	
Návar "80" D " - proti atm	329	62	211	137	350	700	10,00	
Návar "80" U "	339	56	221	152	350	700	10,00	

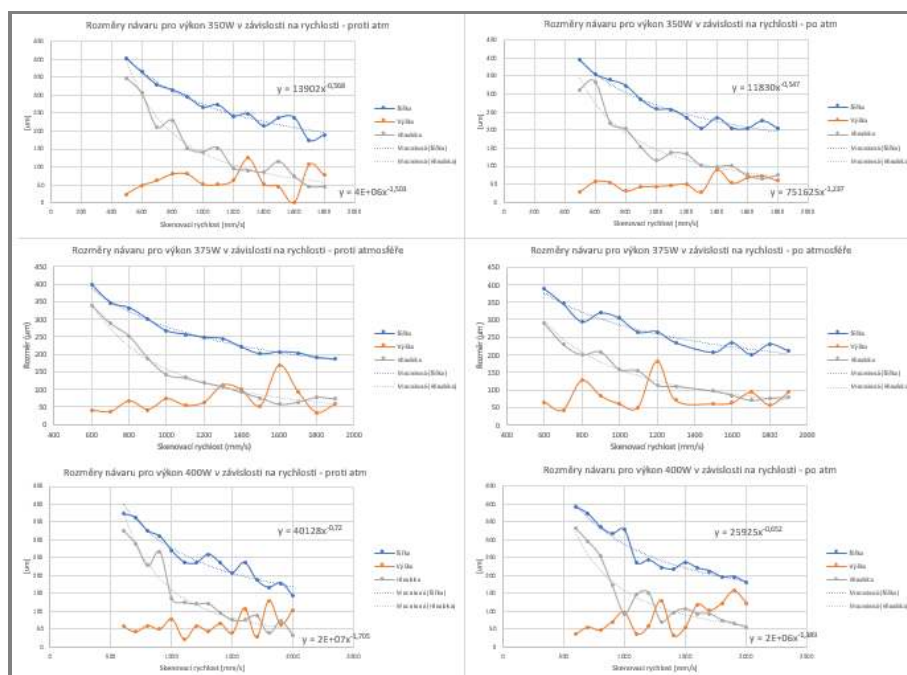
Obr. 7.4 Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 2

Název	Šířka [μm]	Výška [μm]	Průvar [μm]	Úhel [°]	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	E _s [J/mm ²]	Zhodnocení
Návar "81" D "	324	32	203	157	350	800	8,75	
Návar "81" U " - proti atm	315	81	229	118	350	800	8,75	
Návar "82" D "	285	44	155	162	350	900	7,78	
Návar "82" U " - proti atm	296	81	154	118	350	900	7,78	
Návar "83" D "	258	45	117	145	350	1000	7,00	
Návar "83" U " - proti atm	266	53	142	128	350	1000	7,00	
Návar "84" D "	257	48	137	135	350	1100	6,36	
Návar "84" U " - proti atm	273	51	154	143	350	1100	6,36	
Návar "85" D "	234	51	134	143	350	1200	5,83	
Návar "85" U " - proti atm	242	63	97	179	350	1700	5,83	
Návar "86" D "	205	29	102	161	350	1300	5,38	
Návar "86" U " - proti atm	248	126	91	97	350	1300	5,38	
Návar "87" D "	234	92	100	111	350	1400	5,00	
Návar "87" U " - proti atm	214	54	86	136	350	1400	5,00	
Návar "88" D "	205	54	101	147	350	1500	4,67	
Návar "88" U " - proti atm	236	46	115	137	350	1500	4,67	
Návar "89" D "	204	69	75	125	350	1600	4,38	
Návar "89" U " - proti atm	238	0	74	213	350	1600	4,38	
Návar "90" D "	225	74	67	143	350	1700	4,12	
Návar "90" U " - proti atm	174	108	46	97	350	1700	4,12	
Návar "91" D "	204	60	77	132	350	1800	3,89	
Návar "91" U " - proti atm	190	77	45	125	350	1800	3,89	
Návar "92" D "	389	66	291	140	375	600	12,50	
Návar "92" U " - proti atm	397	40	340	155	375	600	12,50	
Návar "93" D "	346	43	231	155	375	700	10,71	
Návar "93" U " - proti atm	346	36	289	163	375	700	10,71	
Návar "94" D "	294	127	200	111	375	800	9,38	
Návar "94" U " - proti atm	332	67	253	143	375	800	9,38	
Návar "95" D "	319	84	209	131	375	900	8,33	
Návar "95" U " - proti atm	299	42	189	153	375	900	8,33	
Návar "96" D "	304	60	159	155	375	1000	7,50	
Návar "96" U " - proti atm	266	73	142	113	375	1000	7,50	
Návar "97" D "	264	51	155	144	375	1100	6,82	
Návar "97" U " - proti atm	257	54	133	150	375	1100	6,82	
Návar "98" D "	266	182	114	117	375	1200	6,25	
Návar "98" U " - proti atm	248	63	119	150	375	1200	6,25	
Návar "99" D "	234	70	110	133	375	1300	5,77	
Návar "99" U " - proti atm	244	113	109	126	375	1300	5,77	
Návar "100" D "	108	28	127	267	375	1400	5,36	
Návar "100" U " - proti atm	220	99	92	116	375	1400	5,36	
Návar "101" D "	201	53	76	142	375	1500	5,00	
Návar "101" U "	206	60	97	140	375	1500	5,00	
Návar "102" D "	207	170	58	103	375	1600	4,69	
Návar "102" U "	234	63	85	140	375	1600	4,69	
Návar "103" D "	204	95	64	116	375	1700	4,41	
Návar "103" U "	200	93	70	115	375	1700	4,41	
Návar "104" D "	191	34	78	145	375	1800	4,17	
Návar "104" U "	230	57	77	128	375	1800	4,17	
Návar "105" D "	187	58	73	137	375	1900	3,95	
Návar "105" U "	210	93	79	115	375	1900	3,95	
Návar "106" D "	375	57	326	149	400	600	13,33	
Návar "106" U "	392	36	334	163	400	600	13,33	
Návar "107" D "	363	43	289	154	400	700	11,43	
Návar "107" U "	374	55	297	152	400	700	11,43	
Návar "108" D "	326	60	228	146	400	800	10,00	
Návar "108" U "	337	47	255	145	400	800	10,00	
Návar "109" D "	311	50	268	141	400	900	8,89	
Návar "109" U "	317	71	172	134	400	900	8,89	
Návar "110" D "	269	78	135	122	400	1000	8,00	
Návar "110" U "	328	97	93	141	400	1000	8,00	
Návar "111" D "	238	22	126	214	400	1100	7,27	
Návar "111" U "	236	37	146	150	400	1100	7,27	
Návar "112" D "	235	59	121	135	400	1200	6,67	
Návar "112" U "	243	59	151	147	400	1200	6,67	
Návar "113" D "	260	45	122	150	400	1300	6,15	
Návar "113" U "	223	130	70	101	400	1300	6,15	
Návar "114" D "	235	66	97	113	400	1400	5,71	
Návar "114" U "	217	34	96	152	400	1400	5,71	
Návar "115" D "	208	39	76	146	400	1500	5,33	
Návar "115" U "	236	55	106	141	400	1500	5,33	
Návar "116" D "	237	108	76	96	400	1600	5,00	
Návar "116" U "	220	118	93	90	400	1600	5,00	
Návar "117" D "	187	28	89	152	400	1700	4,71	
Návar "117" U "	212	101	92	106	400	1700	4,71	
Návar "118" D "	166	129	39	99	400	1800	4,44	
Návar "118" U "	195	122	74	115	400	1800	4,44	
Návar "119" D "	179	63	73	122	400	1900	4,21	
Návar "119" U "	196	157	65	95	400	1900	4,21	
Návar "120" D "	142	103	34	101	400	2000	4,00	
Návar "120" U "	179	122	53	88	400	2000	4,00	

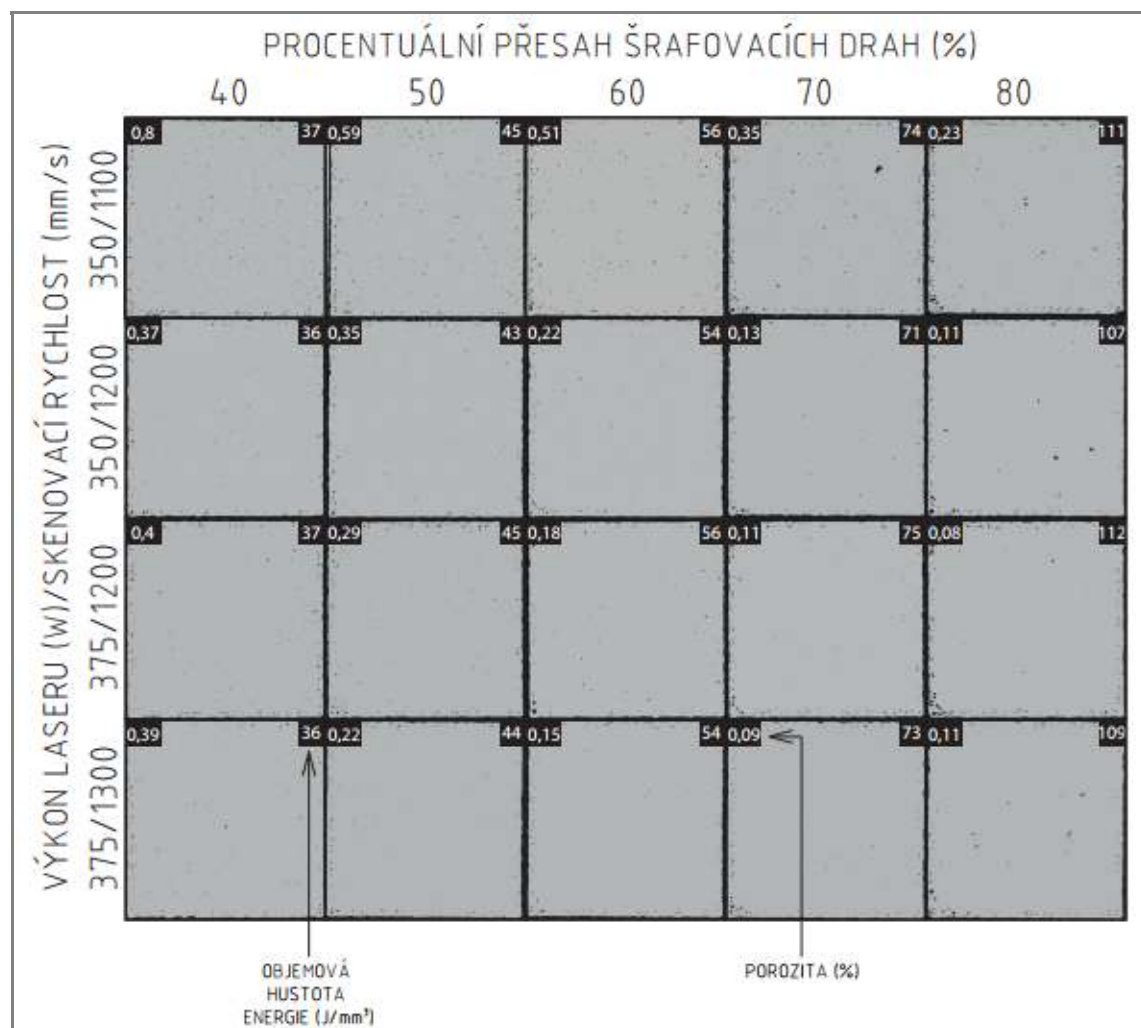
Obr. 7.5 Tabulka rozměrových a výrobních specifikací pro jednotlivé návary s jejich ohodnocením - část 3



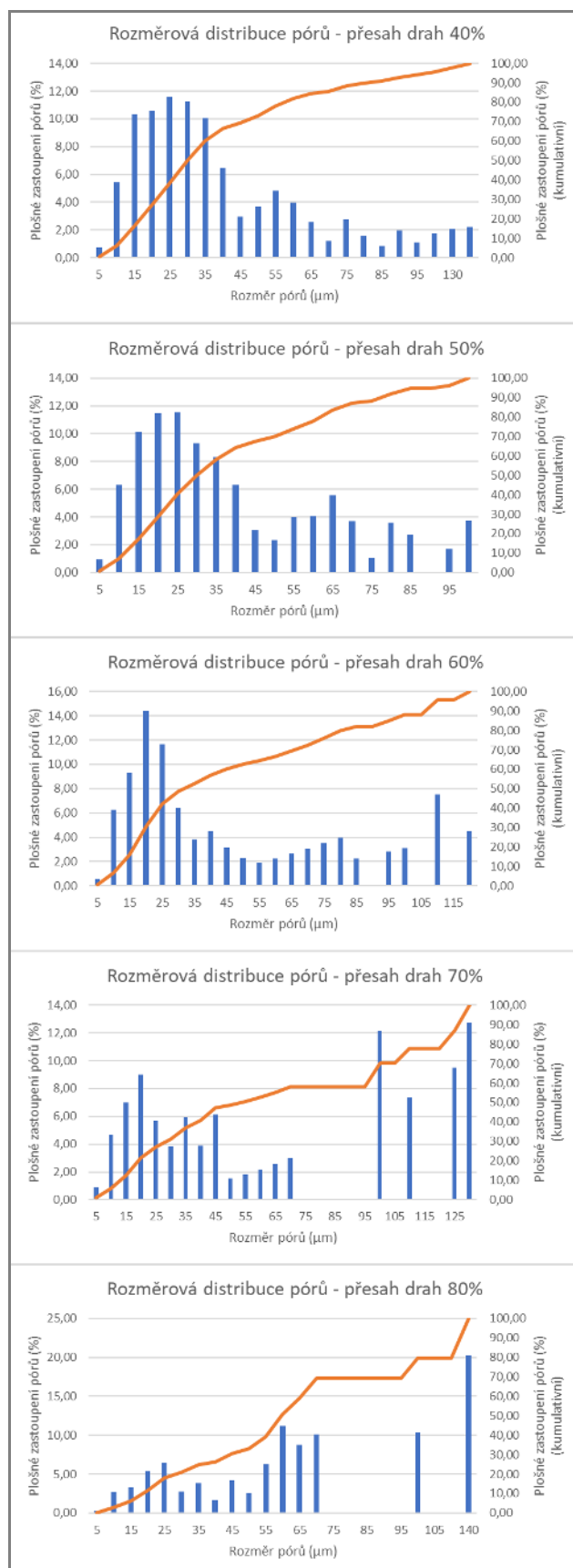
Obr. 7.6 Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro daný výkon laseru - část 1



Obr. 7.7 Grafy závislosti rozměrů návarů na skenovací rychlosti laseru pro daný výkon laseru - část 2



Obr. 7.8 Mapa vybroušených vzorků objemového testu II



Obr. 7.9 Grafy rozměrové distribuce vzorků objemového testu II postavené procesními parametry 375 W výkon laseru a 1200 mm/s skenovací rychlost laseru pro jednotlivé procentuální přesahy šrafovacích drah